



**UNIVERSIDAD  
DE GRANADA**

TRABAJO FIN DE GRADO  
INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

**Sistema de bajo coste basado en bobinas  
para la monitorización de la humedad del  
suelo en entornos agrícolas**

---

Diseño y desarrollo de una mota sensora y red de datos

**Autor**

Pablo Rodríguez Martín

**Directora**

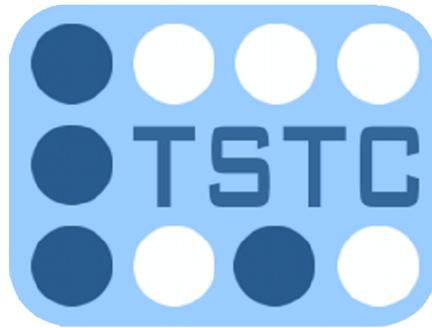
Sandra Sendra Compte



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍAS INFORMÁTICA Y DE  
TELECOMUNICACIÓN

Granada, julio de 2020





# Sistema de bajo coste basado en bobinas para la monitorización de la humedad del suelo en entornos agrícolas

---

Diseño y desarrollo de una mota sensora y red de datos

**Autor**

Pablo Rodríguez Martín

**Directores**

Sandra Sendra Compte

DEPARTAMENTO DE TEORÍA DE LA SEÑAL, TELEMÁTICA Y COMUNICACIONES

Granada, julio de 2020



# Sistema de bajo coste basado en bobinas para la monitorización de la humedad del suelo en entornos agrícolas: Diseño y desarrollo de una mota sensora y red de datos

Pablo Rodríguez Martín

**Palabras clave:** bajo coste, inducción electromagnética, bobinas, humedad del suelo, temperatura, mota sensora, entornos agrícolas, monitorización, *Internet de las cosas*, consumo, IC 555, LoRaWAN, ChirpStack, InfluxDB, Grafana.

## Resumen

En el presente documento se expone una solución de un sensor bajo coste para la optimización del riego de suelos agrícolas basado en la inducción mutua entre bobinas para la medición de la humedad porcentual del suelo a diferentes niveles de profundidad en tiempo real, así desde la superficie hasta las raíces del cultivo. Después de realizar un estudio del mercado en el ámbito de los sensores de humedad del suelo se ha concluido con la escasa eficiencia y durabilidad de ciertos modelos mientras otros que proporcionan una mejor solución elevan mucho el coste de adquisición e implementación de una red sensorica para tal fin. Es por ello por lo que, partiendo de la base electromagnética comprendida a lo largo del Grado de Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación y la correspondiente investigación de este fenómeno, se ha llevado a cabo una experimentación comparando los diferentes prototipos de inductancias y la orientación y relación entre ellas. El principal objetivo de ello ha sido encontrar una combinación óptima que permita obtener el nivel de humedad de la forma más lineal posible y con un nivel de tensión lo suficientemente elevado para su lectura por un microcontrolador, todo ello con el menor consumo de potencia posible para su mayor autonomía. Esto se ha logrado con un modelo de dos bobinas formadas por hilo de cobre con un calibre de 0.4mm enrollado en una relación 1:1 de 40 espiras cada una y operando a una frecuencia de 210kHz. Adicionalmente, se ha desarrollado el esquema electrónico basado en el circuito integrado 555 para convertir la señal DC de una pila o batería a una señal AC de mayor voltaje para la alimentación del circuito encargado de la lectura de los datos de humedad y el correspondiente sistema telemático basado en la tecnología inalámbrica *IoT* de LoRaWAN mediante un microcontrolador ESP32-LoRa, que permite la recepción de dichos datos y su posterior procesamiento mediante la solución *open-source* de *ChirpStack* para lograr controlar de forma centralizada el riego del cultivo y monitorización con la integración de *InfluxDB* y *Grafana*, optimizando así tanto el coste del consumo de agua como el coste asociado a la implementación de tal sistema.



# Low cost system based on coils for ground humidity monitoring in agricultural environments: Design and development of a mote and data network

Pablo Rodríguez Martín

**Keywords:** low cost, electromagnetic induction, coils, soil moisture, temperature, mote, agriculture environments, monitoring, *Internet of Things*, consumption, IC 555, LoRaWAN, ChirpStack, InfluxDB, Grafana.

## Abstract

This document presents a solution of a low-cost sensor for optimizing agricultural soil irrigation based on mutual induction between coils for the percentual measurement of soil moisture at different depth levels in real time, from the surface to the crop roots. After carrying out a research of the soil moisture sensors market, it concluded with the poor efficiency and durability of certain models, while others that provide a better solution greatly increase the cost of acquiring and implementing a sensor network for such objective. That is why, based on the electromagnetic basis included throughout the Degree in Telecommunications Technologies Engineering and the corresponding investigation of this phenomenon, an experimentation has been carried out comparing the different prototypes of inductances and the orientation and relationship between them. The main purpose of this is to find an optimal combination that allows obtaining the humidity level in the most linear way as possible and with a voltage level high enough to be read by a microcontroller, always trying to achieve the lowest power consumption for a greater autonomy. This has been achieved with a model of two coils formed by copper wire with a 0.4mm caliber wound in a 1:1 ratio of 40 turns each and operating at a frequency of 210kHz. Additionally, the electronic scheme based on the 555 integrated circuit has been developed to convert the DC signal from a solar cell or battery to a higher AC voltage signal to supply the circuit responsible for reading the moisture data and the corresponding telematic system based on LoRaWAN's *IoT* wireless technology using an ESP32 LoRa microcontroller, which will allow the reception of the data and its subsequent processing using the open-source solution of *ChirpStack* to achieve centralized control irrigation of the crop and its monitoring by the *InfluxDB* and *Grafana* integration, thus optimizing both the cost of water consumption and the cost associated with the implementation of such a system.



---

Yo, **Pablo Rodríguez Martín**, alumno de la titulación Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación de la **Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación de la Universidad de Granada**, con DNI 75571979-M, autorizo la ubicación de la siguiente copia de mi Trabajo Fin de Grado en la biblioteca del centro para que pueda ser consultada por las personas que lo deseen.

Fdo: Pablo Rodríguez Martín

Granada a 7 de julio de 2020.



---

Dña. **Sandra Sendra Compte**, Profesora del Área de Ingeniería Telemática del Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones de la Universidad de Granada.

**Informa:**

Que el presente trabajo, titulado *Sistema de bajo coste basado en bobinas para la monitorización de la humedad del suelo en entornos agrícolas, diseño y desarrollo de una mota sensora y red de datos*, ha sido realizado bajo su supervisión por **Pablo Rodríguez Martín**, y autorizamos la defensa de dicho trabajo ante el tribunal que corresponda.

Y para que conste, expiden y firman el presente informe en Granada a 7 de julio de 2020.

**La directora:**

**Sandra Sendra Compte**



# Agradecimientos

Quiero dar las gracias en primer lugar a todas las personas que han estado presentes a lo largo de las diferentes etapas de mi formación, en especial a todos/as aquellos/as profesores/as y compañeros/as por haberse esforzado en todo momento a ayudarme y haberme enseñado los conocimientos y valores con los que finalmente realizo este proyecto.

En segundo lugar, quiero expresar mi agradecimiento a mi tutora, Sandra, por haberme guiado y ayudado al desarrollo de este proyecto en el que he logrado aprender mucho sobre los ámbitos que más me han motivado su estudio durante la carrera.

Por último, quiero mostrar mi especial agradecimiento a mi familia y amigos/as por todo el apoyo recibido, pues siempre han estado a mi lado durante mis éxitos y fracasos, me han dado ánimos para proseguir y nunca han dudado de que lograría alcanzar mis metas, particularmente en estos tiempos de pandemia tan complicados que en determinados momentos nos han hecho dudar de las cosas pero que en todo momento, pese a la distancia, he sentido su presencia.



# Índice general

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Introducción</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1. Motivación y objetivos del proyecto . . . . .                          | 1         |
| 1.2. Planificación y metodología del proyecto . . . . .                     | 3         |
| 1.3. Presupuesto del proyecto . . . . .                                     | 5         |
| 1.4. Estructura de la memoria . . . . .                                     | 6         |
| <b>2. Estado del Arte</b>   | <b>9</b>  |
| 2.1. Humedad en la tierra . . . . .   | 9         |
| 2.2. Medición de la humedad en la tierra. Mercado actual . . . . .          | 12        |
| 2.2.1. Introducción a la monitorización de la humedad . . . . .             | 12        |
| 2.2.2. Métodos de medición de la humedad y evolución . . . . .              | 13        |
| 2.2.3. Propuesta de ensayo . . . . .  | 19        |
| 2.2.4. Sensores competidores accesibles en el mercado actual IoT . . . . .  | 20        |
| 2.3. Inducción electromagnética en bobinas . . . . .                        | 21        |
| 2.3.1. Principios de inducción electromagnética . . . . .                   | 21        |
| 2.3.2. Comportamiento de las bobinas. Inductancia . . . . .                 | 23        |
| 2.3.3. Inducción mutua entre bobinas . . . . .                              | 25        |
| 2.3.4. Caracterización de la inducción mutua en función del medio . . . . . | 27        |
| 2.3.5. Inductores. Solenoides y toroides . . . . .                          | 28        |
| 2.3.6. Orientación a las bobinas experimentales . . . . .                   | 32        |
| 2.4. Red telemática basada en IoT . . . . .                                 | 33        |
| 2.4.1. Introducción a <i>Internet of Things</i> . . . . .                   | 33        |
| 2.4.2. Tecnologías inalámbricas basadas en IoT . . . . .                    | 35        |
| 2.4.3. Propuesta de desarrollo . . . . .                                    | 35        |
| 2.4.4. Tecnología estándar de LoRa . . . . .                                | 36        |
| 2.4.5. Entorno LoRaWAN . . . . .  | 38        |
| <b>3. Herramientas hardware y software</b>                                  | <b>43</b> |
| 3.1. Hardware . . . . .   | 43        |
| 3.1.1. Circuito integrado 555 . . . . .                                     | 43        |
| 3.1.2. TTGO ESP32 LoRa 868MHz . . . . .                                     | 46        |
| 3.1.3. Gateway basado en LoRaWAN para la recepción de datos . . . . .       | 48        |
| 3.1.4. Raspberry Pi 3B+ con Raspbian . . . . .                              | 48        |
| 3.2. Software . . . . .   | 50        |
| 3.2.1. Simulador de circuitos electrónicos de OrCAD . . . . .               | 50        |
| 3.2.2. Interfaz de programación de sistemas Arduino IDE . . . . .           | 51        |
| 3.2.3. ChirpStack . . . . .   | 52        |

---

|   |            |
|---|------------|
| <b>4. Diseño del sistema</b>  | <b>55</b>  |
| 4.1. Implementación del circuito de alimentación . . . . .                | 56         |
| 4.1.1. Primera toma de contacto con el Circuito Integrado 555 . . . . .   | 56         |
| 4.1.2. Diseño del circuito de alimentación a partir del ICM7555 . . . . . | 60         |
| 4.2. Experimentación con diferentes tipos de bobinas . . . . .            | 65         |
| 4.2.1. Primera toma de contacto con bobinas . . . . .                     | 67         |
| 4.2.2. Experimentación con el primer prototipo . . . . .                  | 69         |
| 4.2.3. Experimentación con el segundo prototipo . . . . .                 | 71         |
| 4.2.4. Experimentación con el tercer prototipo . . . . .                  | 72         |
| 4.2.5. Experimentación con el cuarto prototipo . . . . .                  | 73         |
| 4.2.6. Conclusiones obtenidas a partir de los resultados . . . . .        | 74         |
| 4.2.7. Integración del sensor en el circuito de alimentación . . . . .    | 75         |
| 4.3. Implementación de la red LoRaWAN . . . . .                           | 76         |
| 4.3.1. Primera toma de contacto con módulos ESP32 LoRa . . . . .          | 76         |
| 4.3.2. Montaje de los servidores LoRaServer . . . . .                     | 79         |
| 4.3.3. Configuraciones previas en Arduino IDE . . . . .                   | 82         |
| 4.3.4. Configuración del gateway monocanal . . . . .                      | 83         |
| 4.3.5. Configuración de la mota sensora . . . . .                         | 85         |
| 4.3.6. Aplicación integrada con InfluxDB y Grafana . . . . .              | 86         |
| 4.3.7. Primeras pruebas de la red LoRaWAN . . . . .                       | 89         |
| 4.4. Desarrollo del primer prototipo del sistema final . . . . .          | 93         |
| <b>5. Prueba final del proyecto y resultados</b>                          | <b>95</b>  |
| <b>6. Conclusiones y líneas futuras</b>                                   | <b>99</b>  |
| <b>Bibliografía</b>   | <b>105</b> |

# Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| 1.1. Riego a manta de un cultivo en la vega . . . . .                                   | 2  |
| 1.2. Diagrama de Gantt sobre la planificación del proyecto . . . . .                    | 4  |
| 2.1. Límites de agua útil por tipo de suelo . . . . .                                   | 10 |
| 2.2. Tipos de aguas en el suelo . . . . .   | 11 |
| 2.3. Técnica de irrigación en Mesopotamia . . . . .                                     | 12 |
| 2.4. Estufa de laboratorio con muestras de tierra . . . . .                             | 13 |
| 2.5. Tensiómetro . . . . .  | 14 |
| 2.6. Sistema de atenuación de neutrones . . . . .                                       | 15 |
| 2.7. Esquema de funcionamiento dispositivo RDT . . . . .                                | 16 |
| 2.8. Dispositivos RDF . . . . .   | 17 |
| 2.9. Campo eléctrico generado por dispositivos RDF . . . . .                            | 17 |
| 2.10. Sensores resistivos . . . . .   | 18 |
| 2.11. Sensor de infrarrojos . . . . .   | 18 |
| 2.12. Sensor capacitivo más comercializado (CSMSv1.2) . . . . .                         | 20 |
| 2.13. Campo magnético inducido en la bobina . . . . .                                   | 23 |
| 2.14. Desfase de $90^\circ$ en retraso entre tensión y corriente en la bobina . . . . . | 25 |
| 2.15. Permeabilidad magnética en función del tipo de material . . . . .                 | 28 |
| 2.16. Bobina toroidal . . . . .   | 29 |
| 2.17. Modelo equivalente de una bobina real . . . . .                                   | 30 |
| 2.18. Comportamiento real de una bobina . . . . .                                       | 30 |
| 2.19. Resonancia con inducción mutua . . . . .  | 31 |
| 2.20. Análisis sobre el crecimiento de IoT por segmento y continente . . . . .          | 34 |
| 2.21. Transmisión de símbolos en la modulación CSS de LoRa . . . . .                    | 37 |
| 2.22. Datagrama de la capa física de LoRa . . . . .                                     | 38 |
| 2.23. Modelo de capas de LoRaWAN . . . . .  | 39 |
| 2.24. Topología de la red LoRaWAN . . . . .   | 40 |
| 2.25. Esquema de transmisión de datos de la red LoRaWAN . . . . .                       | 41 |
| 3.1. Esquema interno de un temporizador 555 . . . . .                                   | 44 |
| 3.2. Modo de operación Astable del 555 . . . . .  | 45 |
| 3.3. TTGO ESP32 LoRa v1 con antena de 868MHz . . . . .                                  | 46 |
| 3.4. Mapeado de pines del ESP32 LoRa v1 TTGO . . . . .                                  | 47 |
| 3.5. SBC Raspberry Pi 3B+ . . . . .   | 49 |
| 3.6. Mapeado de pines de la Raspberry Pi 3B+ . . . . .                                  | 49 |
| 3.7. Captura de la GUI de Raspbian OS . . . . .   | 50 |
| 3.8. Captura de la GUI de OrCAD . . . . .   | 51 |
| 3.9. Interfaz de programación de Arduino IDE . . . . .                                  | 52 |
| 3.10. Arquitectura de la red LoRaWAN con ChirpStack . . . . .                           | 53 |

|  |    |
|--|----|
| 3.11. Interfaz web de ChirpStack . . . . .   | 54 |
| 4.1. Circuito de prueba del NE555P . . . . .   | 56 |
| 4.2. Frecuencia obtenida en función de la capacidad . . . . .                          | 58 |
| 4.3. ICM7555 vs. NE555P . . . . .  | 59 |
| 4.4. Esquemático del circuito de alimentación . . . . .                                | 61 |
| 4.5. Gráfica de corrientes en emisores y la bobina primaria . . . . .                  | 61 |
| 4.6. Valor de la tensión de salida del sistema en función del tiempo . . . . .         | 62 |
| 4.7. Valor de la tensión de salida del sistema con un menor acoplamiento . . . . .     | 63 |
| 4.8. Montaje del circuito de alimentación . . . . .                                    | 63 |
| 4.9. Esquema del circuito de experimentación con bobinas . . . . .                     | 64 |
| 4.10. Montaje del circuito de experimentación con bobinas . . . . .                    | 64 |
| 4.11. Prueba del circuito de experimentación con bobina de núcleo de aire . . . . .    | 67 |
| 4.12. Prueba del circuito de experimentación con bobina de núcleo de ferrita . . . . . | 67 |
| 4.13. Prueba del circuito de experimentación con bobina a menor frecuencia . . . . .   | 68 |
| 4.14. Prueba del circuito de experimentación con bobina a mayor frecuencia . . . . .   | 68 |
| 4.15. Prototipos reales de bobinas utilizados para la experimentación . . . . .        | 69 |
| 4.16. Experimentación con el prototipo 1 (a) . . . . .                                 | 70 |
| 4.17. Experimentación con el Prototipo 1 (b) . . . . .                                 | 70 |
| 4.18. Experimentación con el Prototipo 2 (a) . . . . .                                 | 71 |
| 4.19. Experimentación con el Prototipo 2 (b) . . . . .                                 | 71 |
| 4.20. Experimentación con el Prototipo 3 (a) . . . . .                                 | 72 |
| 4.21. Experimentación con el Prototipo 3 (b) . . . . .                                 | 72 |
| 4.22. Experimentación con el Prototipo 4 (a) . . . . .                                 | 73 |
| 4.23. Experimentación con el Prototipo 4 (b) . . . . .                                 | 73 |
| 4.24. Montaje de los nodos ESP32 LoRa con entrada ADC . . . . .                        | 77 |
| 4.25. Voltaje (analógico) vs. lectura ADC (nivel digital) experimental . . . . .       | 77 |
| 4.26. Humedad porcentual experimental con <i>map()</i> . . . . .                       | 78 |
| 4.27. Configuración del servidor de red de LoRaServer . . . . .                        | 80 |
| 4.28. Configuración de la organización . . . . .                                       | 80 |
| 4.29. Configuración del perfil de un empleado . . . . .                                | 80 |
| 4.30. Configuración de la aplicación de humedad del suelo . . . . .                    | 81 |
| 4.31. Configuración del gateway monocanal . . . . .                                    | 81 |
| 4.32. Configuración del dispositivo final . . . . .                                    | 82 |
| 4.33. Prueba de la comunicación entre nodo final (arriba) y gateway (abajo) . . . . .  | 86 |
| 4.34. Configuración de la integración con InfluxDB . . . . .                           | 88 |
| 4.35. Comprobación del funcionamiento de LoRaServer con InfluxDB . . . . .             | 88 |
| 4.36. Verificación de los datos de la humedad en InfluxDB . . . . .                    | 89 |
| 4.37. Transmisiones recibidas por el servidor de red de LoRaServer . . . . .           | 90 |
| 4.38. Transmisiones recibidas por el servidor de aplicación de LoRaServer . . . . .    | 91 |
| 4.39. Representación gráfica de los datos en Grafana . . . . .                         | 91 |
| 4.40. Disparo de alarma por nivel bajo de humedad en Grafana . . . . .                 | 92 |
| 4.41. Valores de tensión de salida del sensor para la humedad del suelo . . . . .      | 93 |
| 5.1. Prueba general del sistema en conjunto . . . . .                                  | 95 |
| 5.2. Datos recopilados por el nodo final y transmitidos al gateway . . . . .           | 96 |
| 5.3. Datos recopilados por el servidor de red de LoRaServer . . . . .                  | 96 |
| 5.4. Datos procesados por el servidor de aplicación de LoRaServer . . . . .            | 97 |
| 5.5. Datos recopilados en la aplicación . . . . .                                      | 97 |

# Índice de tablas

|   |     |
|---|-----|
| 1.1. Presupuesto general confeccionado previamente al proyecto . . . . .      | 5   |
| 2.1. Contraste entre métodos de medición de humedad del suelo . . . . .       | 19  |
| 2.2. Comparativa entre sensores de humedad del suelo en el mercado . . . . .  | 20  |
| 2.3. Contraste entre tecnologías inalámbricas IoT en Europa . . . . .         | 35  |
| 4.1. Valores obtenidos experimentalmente de la prueba 1 del NE555P . . . . .  | 57  |
| 4.2. Valores obtenidos experimentalmente de la prueba 2 del NE555P . . . . .  | 58  |
| 4.3. Valores obtenidos experimentalmente de la prueba 1 del ICM7555 . . . . . | 59  |
| 4.4. Prototipos para el sistema sensor de humedad basado en bobinas . . . . . | 66  |
| 4.5. Capacidad para la resonancia del circuito de alimentación . . . . .      | 75  |
| 4.6. Pines del ESP32 reservados al controlador SX1276 de LoRa . . . . .       | 76  |
| 4.7. Listado de puertos utilizados en LoRaServer . . . . .                    | 79  |
| 4.8. Pines SPI del ESP32 utilizados en la librería LMIC . . . . .             | 85  |
| 4.9. Rango digital para el sensor de humedad . . . . .                        | 94  |
| 6.1. Presupuesto final del proyecto . . . . .                                 | 101 |



# Capítulo 1

## Introducción

Desde el siglo VIII, con la conquista de la península por el Califato Omeya, nuestra sociedad ha heredado importantes avances tecnológicos y culturales. Si hay un campo en el que realmente destacan sus aportaciones, además de la arquitectura y la medicina, es el de la gran innovación de las infraestructuras y técnicas de canalización del agua, las cuales quedan reflejadas en la sociedad actual ya que hoy día las seguimos disfrutando en nuestra vida de forma cotidiana. Esto puede observarse de forma notoria en la Alhambra de Granada, donde además de satisfacer las necesidades funcionales de la ciudad también se buscaba cumplir con los preceptos religiosos y estéticos, dando como resultado el tan admirado monumento. No obstante, el sistema hidráulico urbano andalusí no es el único beneficiario, también los cultivos comenzaron a gozar de nuevas técnicas que más tarde favorecerían el comienzo de la revolución agrícola del siglo XVIII en toda Europa y que permitiría una explotación de cultivos mucho más óptima. Gracias a las canalizaciones existentes que legaron sus antecesores los romanos, se desarrollaron nuevas técnicas para aprovechar mejor el agua, almacenarla para posteriores posibles etapas de sequía, distribuirla por las acequias hasta los diferentes terrenos, etc. Claro ejemplo de ello es la denominada técnica de riego a manta. Ésta consiste en humedecer toda la superficie del terreno durante la apertura de compuertas para que el agua se filtre a dos niveles: en la superficie, aprovechada por árboles y plantas; y en la profundidad, para las condiciones de la tierra.

### 1.1. Motivación y objetivos del proyecto

Esta técnica de riego a manta (Figura 1.1) sigue estando hoy día muy extendida en determinados cultivos, como es el caso de las plantaciones de espárragos en Andalucía o las de naranjos en la Comunidad Valenciana. Sin embargo, esto requiere de especial cuidado por parte del agricultor ya que el propio clima, el desnivel del terreno y la cantidad de agua suministrada pueden provocar que algunas zonas queden demasiado secas o, por el contrario, se rieguen en exceso, afectando así a la producción y la maduración de la cosecha. A esto hay que sumarle el impacto medioambiental y el alto coste económico que supone esa apertura de compuertas para que el agua fluya por el terreno. Es por ello por lo que existe una regulación para su adecuado uso en los cultivos debido, precisamente, al cambio climático en el que se ve envuelto nuestro planeta y que viene arrastrando durante décadas, pues ahora nos encontramos padeciendo un momento de mayor criticidad, en el que el agua puede convertirse en un bien cada vez más escaso en nuestro territorio.



Figura 1.1: Riego a manta de un cultivo en la vega

Nuestra tarea consiste en dar solución a este problema desde una perspectiva más tecnológica para así monitorizar en este tipo de cultivos la cantidad de humedad existente en los diferentes niveles de profundidad del suelo de una forma más exacta y así facilitar el trabajo al agricultor, optimizando el coste económico y ecológico del cultivo. Además, no solo se pretende reducir dicho coste asociado al riego sino también reducirlo lo máximo posible para el coste que conlleva la instalación del sistema que realice las mediciones correspondientes de la humedad sobre el terreno así como su posterior gestión y mantenimiento. Esto requiere de un estudio del mercado actual de los sensores con los que se compiten y que realizan mediciones de la humedad de la tierra y de microcontroladores susceptibles a emplear en cada punto del terreno que procesen la información recogida para así hallar qué posible solución puede aportar un bajo coste para una buena eficiencia.

Dado que el sensor de humedad del suelo a implementar está basado en bobinas, es razonable realizar un estudio previo acerca del comportamiento electromagnético de éstas, viendo así qué posibilidades existen en su construcción para obtener el mejor rendimiento. Una vez se conozca un prototipo de bobinado que cumpla con los requisitos se deberá estudiar el circuito de alimentación que permita la correcta operación del sistema, tratando en todo momento de lograr la mayor eficiencia energética, pues se pretende que la autonomía del sistema sea cuanto más duradera para así alcanzar un menor coste asociado y reducir el mantenimiento del sistema en medida de lo posible.

También es importante el papel que desempeñan la permeabilidad del suelo y la temperatura del entorno, sobretodo esta última ya que el nivel de evaporación del agua regada depende en gran medida de ésta, lo que puede dar lugar a posibles consecuencias sobre el terreno, impidiendo lograr las condiciones óptimas que el agricultor busca con el sistema. Es por ello por lo que en esta investigación se tratará también de combinar dicho sistema con uno de mayor simplicidad que mida la temperatura para cubrir esta variable.

Además, es evidente que esos datos recogidos por el sensor deben ser enviados a algún lugar central en el que se procesen y se lleven a cabo las medidas correspondientes en función del nivel de humedad de cada punto del terreno. Si, por ejemplo, una zona ya está lo suficientemente húmeda pero otra aún no ha sido regada, se puede cortar el suministro a la primera y seguir dejando correr el agua por escorrentía superficial sobre la segunda

con mayor flujo. Se buscará por tanto algún tipo de sistema telemático basado en *IoT* (*Internet of Things*) que sea capaz de transmitir los datos hasta un nodo central que controle el estado de la humedad en cada punto geográfico de cualquier espacio de cultivo. Posteriormente, los datos facilitados por el sistema deben ser accesibles e inteligibles para el usuario a través de una interfaz gráfica que permita su visionado y se lleven las acciones correspondientes ante una situación dada, ya sea de forma manual o automatizada.

Por tanto, una vez conocido el ámbito del proyecto y estudiadas las características, podemos proceder a enumerar los objetivos que han surgido en su planteamiento y que se persiguen a lo largo de éste:

- Investigación, experimentación y posterior comparación de los resultados entre los diferentes prototipos de bobinas. Se tratará de dar la opción más óptima posible en aspectos como el rango de frecuencias empleado, la orientación entre bobinas, la relación entre ellas, etc.
- Análisis del mercado actual de los sensores de humedad y de microcontroladores basados en *IoT*: tipos, características, funcionamiento y coste. Se pretende tener un conocimiento previo de mayor calado sobre la metodología que se emplea habitualmente para la medición de la humedad en terrenos de cultivo y la competencia existente en el mercado que engloba a este proyecto. Se busca también valorar la adquisición de un microcontrolador de bajo coste capaz de ejecutar las tareas de medición sobre el sensor en función de la tecnología de comunicación seleccionada.
- Diseño e implementación del circuito de alimentación del sensor inductivo que sea capaz de proporcionar, a partir de una señal de corriente continua proporcionada por el microcontrolador alimentado, una salida de corriente alterna que permita la inducción mutua entre bobinas.
- Diseño y desarrollo de la red sensorial distribuida a lo largo del terreno basado en la tecnología más conveniente. Se estudiarán las posibles tecnologías de comunicación entre nodos para que los datos sean recogidos y transmitidos en tiempo real de la forma más segura y eficiente posible. Se tratará también de ofrecer una aplicación software que haga visibles estos datos y lance alertas en niveles críticos de humedad.
- Evaluación de eficiencia y costes finales para un posible lanzamiento al mercado. Se comparará por tanto con otros modelos competentes ofrecidos en el mercado, evaluando sus rendimientos y costes.

Para todo ello se aplicarán los conocimientos adquiridos a lo largo de los diferentes cursos del Grado de Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación en la Universidad de Granada, y más concretamente en las ramas de telemática y electrónica, para encontrar la solución que mejor convenga dadas las circunstancias que propician el entorno de la investigación.

## 1.2. Planificación y metodología del proyecto

Dado que este proyecto se basa en la investigación y la posterior experimentación, se han definido diferentes fases para realizarlo.

1. **Fase de investigación.** Se lleva a cabo un proceso de aprehensión de conocimientos relacionados con los diferentes ámbitos del proyecto con la búsqueda de información a través del temario estudiado a lo largo de la carrera y de páginas de referencia en Internet. Estos conocimientos se anotan para las siguientes fases del proyecto.
2. **Fase de preparación.** Se estudian diferentes posibilidades acerca de su implementación basadas en las conclusiones y requisitos obtenidos a partir de la fase de investigación. También se adquirirá en base a esto el material y se organizarán las herramientas necesarias para el desarrollo del proyecto en fases posteriores.
3. **Fase de experimentación.** A partir de los conocimientos adquiridos con la investigación y el material disponible se llevará a cabo la experimentación con los diferentes prototipos de bobinas y la simulación de los dispositivos electrónicos encargados de alimentar el circuito del sensor para recoger los datos. También se experimentará con la transmisión y recepción de los datos para formar una red telemática basada en *IoT*.
4. **Fase de resultados.** Se reunirán los resultados obtenidos de esta experimentación para formar una base sólida en el desarrollo del sistema. Se diseñará un circuito para el sistema y un esquema de la red de datos.
5. **Fase de desarrollo y pruebas.** Se elaborará el sistema final estudiado en fases anteriores, así implementándolo y realizando las pruebas convenientes y posibles correcciones, si las hay.
6. **Fase de redacción de la memoria.** Se reunirán todos los aspectos del proyecto para reflejarlos de forma escrita en una única memoria que dé a conocer su proceso y las conclusiones obtenidas en su realización.

Si se distribuyen estas fases de una forma más concisa a lo largo del tiempo se podría modelar la elaboración del proyecto mediante el siguiente diagrama de Gantt:

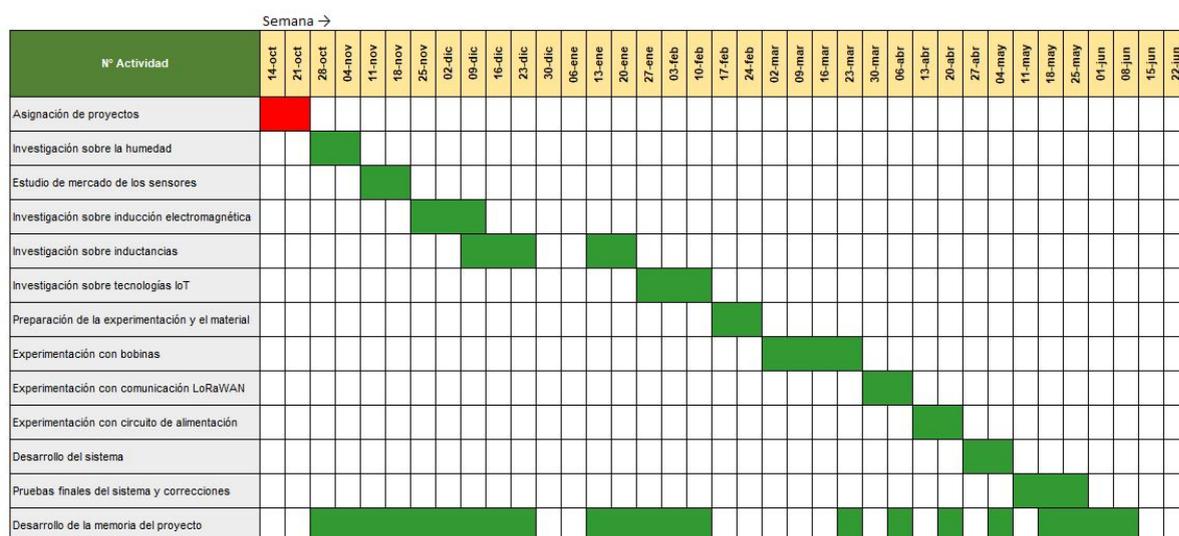


Figura 1.2: Diagrama de Gantt sobre la planificación del proyecto

### 1.3. Presupuesto del proyecto

Para comenzar con este proyecto se ha elaborado a priori un presupuesto general con la Tabla 1.1, en la que se recoge el gasto total de los diferentes elementos que lo componen, así también tanto el coste asociado al tiempo invertido en la investigación y desarrollo del sistema como el beneficio esperado de ello al aplicar una tarifa por el despliegue de la red. Se debe tener en cuenta que este primer presupuesto del proyecto es orientativo, pues a lo largo de éste se especificarán los componentes utilizados y pueden llegar a surgir inconvenientes, por lo que será en el apartado de desarrollo final del sistema en el que se detallará un desglose más exhaustivo del coste del proyecto.

| Detalles                                   | Cantidad      | Precio por unidad |
|--|---------------|-------------------|
| <b>MATERIALES (-)</b>                      |               |                   |
| Bobinado de cobre                          | 5x 100 m      | 5.64€             |
| Circuito Integrado 555                     | 1x 10 pcs     | 2.5€              |
| Lote componentes electrónicos              | 1x 1 pack     | 10€               |
| Nodos de la red de datos                   | 2x 1 pcs      | 15€               |
| Servidores de la red de datos              | 1x 1 pcs      | 35€               |
| SUB-TOTAL                                  |               | <u>68.14€</u>     |
| <b>TIEMPO EMPLEADO (+)</b>                 |               |                   |
| Fase de investigación                      | 15x 8h/semana | 720€              |
| Fase de preparación                        | 2x 5h/semana  | 60€               |
| Fase de experimentación                    | 8x 15h/semana | 720€              |
| Fase de desarrollo y pruebas               | 5x 10h/semana | 300€              |
| Fase de redacción de la memoria            | 8x 4h/semana  | 192€              |
| TIEMPO TOTAL EMPLEADO                      | 332 horas     | <u>1992€</u>      |
| <b>DESPLIEGUE DE LA RED. OPERACIÓN (+)</b> |               |                   |
| Configuración de un nodo final             | 1x nodo       | 2€                |
| Configuración de un nodo de red            | 1x nodo       | 4€                |
| Configuración de un servidor               | 1x servidor   | 25€               |
| SUB-TOTAL                                  |               | <u>31€</u>        |
| <b>COSTE TOTAL DEL PROYECTO</b>            |               | <b>1954.86€</b>   |

Tabla 1.1: Presupuesto general confeccionado previamente al proyecto

Este presupuesto confeccionado viene motivado por los costes que supone el desarrollo de este proyecto a fin de obtener cierta retribución para compensar la inversión realizada. Se debe tener en cuenta por tanto que el sistema estará basado en la construcción de diversos prototipos de bobinas así como de todos los componentes que forman el circuito de alimentación para generar una señal de corriente AC (circuito integrado 555, condensadores, resistencias, cableado, etc) y el sistema de comunicación a fin de transmitir los datos desde el nodo final hacia un servidor, el cual también se contempla dentro de éste. Además, se pretende dar cuenta de todo el tiempo dedicado en la realización de éste en base a la planificación anteriormente comentada considerando un coste de unos 6€ por hora dedicada en conocimiento de que es un proyecto destinado al Trabajo de Fin de Grado. También se establece una tarifa adicional asociada a un coste operacional en base al número y a la tipología de nodos desplegados. El beneficio total percible está en 1954.86€.

## 1.4. Estructura de la memoria

El presente documento se divide en seis capítulos, los cuales se detallan a continuación:

- **Capítulo 1. Introducción.** Breve descripción introductoria a la motivación que insta a la realización de este proyecto y definición de los objetivos principales que se pretenden lograr, así como la planificación temporal, el presupuesto del proyecto y la estructuración del contenido llevada a cabo.
- **Capítulo 2. Estado del Arte.** Investigación documental para trascender en el conocimiento del objeto de estudio, adquiriendo nuevas competencias y permitiendo realizar un análisis crítico para la toma de decisiones. Se centra en la caracterización de la humedad en contacto con la tierra y su absorción por la vegetación. También se realiza una breve reseña histórica a la medición de la humedad en el suelo y métodos empleados para ello gracias a los avances científico-tecnológicos, por los cuales se puede realizar la experimentación con el sensor basado en bobinas propuesto conociendo un valor más exacto de la humedad. Además, se definen los sensores *IoT* de humedad existentes en el mercado actual con los que se compete y se estudian los principios de inducción electromagnética entre bobinas para su comprensión previa y posterior desarrollo de estrategias en la fase de experimentación. Por último se realiza un estudio sobre las posibles tecnologías de comunicación y microcontroladores a emplear en la red telemática que se pretende implementar para reunir los datos recogidos en un punto central y procesarlos, centrándose así en LoRa/LoRaWAN como la elegida por sus mayores prestaciones a un precio más reducido en el mercado.
- **Capítulo 3. Herramientas hardware y software.** Se definen y explican las diferentes herramientas hardware y software que se emplearán en el diseño y el desarrollo del proyecto, contando así con los recursos utilizados tanto en el circuito de alimentación de las bobinas experimentales como en la programación de las comunicaciones entre nodos y la aplicación desarrollada. Nótese que, por la situación en la que se ha desarrollado este proyecto a causa de la pandemia global ocasionada por el SARS-CoV-2, no se cuenta con instrumentación de laboratorio como podría ser un generador de señales o un osciloscopio.
- **Capítulo 4. Diseño del sistema.** Se procede a implementar el sistema en base a los conocimientos aprehendidos durante la investigación, tanto el esquema electrónico que lleva a cabo las mediciones como la red telemática y la aplicación. Se experimenta con diferentes prototipos de bobinas y se programa la actividad del sistema para la recogida de los datos, no sin antes introducir la metodología a llevar a cabo y el circuito por el que se ha optado para generar las señales de corriente que circularán por dichas bobinas. Finalmente se establecen las comunicaciones entre nodos que posibilitan la transmisión de los datos, se integra la bobina mejor considerada al circuito de alimentación y posteriormente se adapta su salida al módulo de transmisión para estudiar el comportamiento de los mismos frente a diferentes niveles de humedad.
- **Capítulo 5. Prueba final del proyecto y resultados.** Se realiza una serie de tests finales englobados en una prueba general para comprobar el funcionamiento del sistema en su conjunto y se analizan los resultados.

- **Capítulo 6. Conclusiones y trabajo futuro.** Se llevan a cabo las conclusiones del proyecto a través de los resultados obtenidos y se propone una línea de trabajo basado en las conclusiones para la mejora del sistema en el futuro a corto y largo plazo. Finalmente, se realiza un desglose de costes asociados al proyecto en referencia al presupuesto inicialmente planteado.



## Capítulo 2

# Estado del Arte

### 2.1. Humedad en la tierra

La humedad es un fenómeno natural que se relaciona directamente con el volumen de agua o vapor de agua presente en el entorno de un cuerpo, es decir, en el aire que lo envuelve, sobre su superficie o en su interior. Cuanto mayor es este volumen, mayor es el grado con el que se manifiesta la humedad en un espacio, afectando tanto al medio como a los materiales que constituyen los objetos con los que el ser humano interactúa de forma habitual, así como pueden ser los dispositivos electrónicos, materiales de construcción, el clima, los alimentos, las propiedades de la tierra en los cultivos, etc. Es habitual que un Arquitecto realice su estudio, entre otros muchos aspectos, sobre la humedad en un determinado punto de la geografía sobre la que se prevé el proyecto ya que de ella depende la elección de materiales de construcción como el acero por su alta corrosión en las zonas costeras o la elaboración del diseño de los sistemas de ventilación del edificio. También es algo a tener en cuenta en el ámbito de las telecomunicaciones ya que perjudica a la propagación de señales electromagnéticas y a los propios equipos electrónicos encargados de su transmisión y recepción en cuanto a rendimiento. Sin embargo, la humedad no siempre se enmarca dentro de un contexto negativo, también puede ser beneficiosa para los seres vivos, siempre y cuando se encuentre dentro de unos determinados límites, pues en casos más extremos como el de un ambiente seco o un excesivo nivel de humedad también puede llegar a ser dañino para la fauna y flora del planeta, y por tanto para nuestra salud. Ocurre lo mismo con la tierra, pues la vegetación que crece en ella puede llegar a perecer cuando se sobrepasan dichos límites. Tal es el caso de los cultivos en los que nos centramos, pues un exceso de riego puede asfixiar la plantación, pero también la falta de agua puede marchitarla y causar graves daños a la producción.

Las plantas absorben el agua del sedimento a través de sus pelos absorbentes que parten desde sus raíces gracias a la diferencia de energía existente entre la tierra, donde se encuentran éstas; y la atmósfera que las envuelve y, por consiguiente, su extensión en altura sobre la superficie del suelo. De haber mayor humedad en el suelo que dentro de la planta se produce el efecto de ósmosis[1] dentro de las células vegetales de estos pelos absorbentes y el agua se propaga hacia arriba por capilaridad a través de su interior para así poder realizar la fotosíntesis en las hojas y adquirir la energía necesaria para continuar con sus funciones básicas. Este proceso se puede ver afectado cuando la temperatura es demasiado alta o no hay suficiente humedad en el suelo, así bloqueándose e impidiendo que las células vegetales sean capaces de realizar esta función, aunque esto también ocurre

en los casos en los que las raíces están saturadas por exceso de humedad, por lo que la planta no logra transpirar y podría llegar a morir cuando se riega demasiado, lo que se conoce como «asfixia radical». Existen los denominados rangos de confort en los que la planta puede subsistir sin llegar a sufrir estos casos extremos y que se pretenden mantener a través del sistema propuesto.

Estos rangos de confort de humedad dependerán sobretodo de la especie, pues no todas requieren las mismas cantidades de agua para subsistir; así como de la profundidad de sus raíces, pues debido a las características del suelo, ya sea más arenoso o más arcilloso, el agua podría drenar demasiado rápido al subsuelo y dejar a la plantación sin agua; o incluso ocurrir todo lo contrario, que el agua se evapore antes de llegar tan siquiera a las raíces, respectivamente. Por tanto, estas condiciones de riego también dependerán de otros factores del suelo como la permeabilidad de la tierra o la porosidad del compuesto que la forma. Además, las propias plantas absorberán el agua del suelo y la perderán por transpiración, lo que en su conjunto se conoce como evapotranspiración, con lo que los niveles de humedad seguirán disminuyendo a medida que transcurra el tiempo, por lo que de no regar el cultivo periódicamente también se podría perder la cosecha.

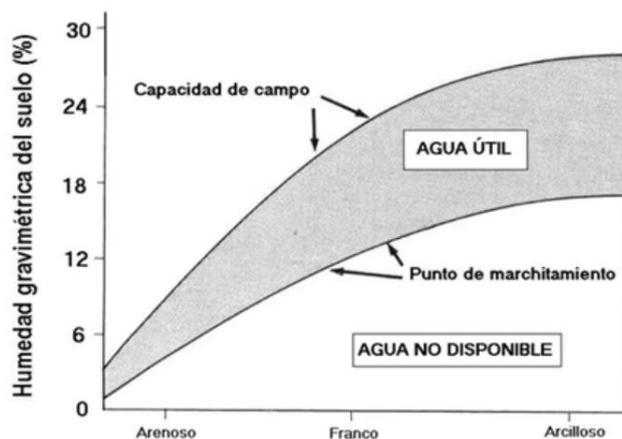


Figura 2.1: Límites de agua útil por tipo de suelo

Sin embargo, no toda la humedad que permanece en el suelo puede ser aprovechada, ya que la planta solo es capaz de absorber el agua capilar o útil, es decir, aquella que por efecto de capilaridad no se ve afectada por la gravedad gracias a su tensión superficial y permanece en los microporos de la tierra próximos a las raíces de una plantación, incluso en los periodos sin irrigación ya que parte del agua que se encuentra más profunda tiende a ascender por dicho fenómeno. Estos microporos son aquellos a través de los cuales las raíces se van abriendo paso para continuar absorbiendo mayor humedad de las zonas más profundas del suelo. Por el contrario, una parte de ese agua regada, denominada agua ligada, queda adherida a las moléculas de la tierra, lo que hace imposible su absorción. Por tanto, la planta solo es capaz de absorber el agua que se encuentra entre los niveles de máxima retención del agua por parte de la tierra conocido como Capacidad de Campo (CC), que es todo ese agua capilar que permanece en los microporos del suelo frente a la evapotranspiración y el drenaje hasta unas 48 horas después de haber regado; y el Punto de Marchitamiento (PM), que es esa cantidad de agua ligada que no puede ser absorbida por la planta[2] y que puede ocasionar que la planta se seque, tal y como se puede apreciar (Figuras 2.1 y 2.2). Para un mismo nivel de humedad de la tierra, estos límites pueden variar en función del tipo de suelo, siendo más próximos entre ellos en los

suelos más arenosos y más distantes en los más arcillosos. Esta diferencia entre límites es ese agua útil que la planta puede absorber. Estos dos valores son muy importantes para el control de la humedad de un cultivo y han de estudiarse con antelación y con las herramientas adecuadas (e.g. cámaras de presión, estufas de laboratorio, etc.) para así establecer márgenes de alarma del sistema cuando los valores medidos los sobrepasen. Es por esto por lo que se le da mayor protagonismo a este fenómeno en la investigación para así tratar el problema con el mayor nivel detalle posible, pues se pretende que el sistema sea capaz de mantener esos márgenes de humedad para el tipo de suelo, pero también los óptimos para una determinada especie vegetal.

El mayor problema de esto viene cuando después de la irrigación el cultivo se ve expuesto a temperaturas más altas ya que este agua capilar ni tan siquiera llega a la superficie en su ascensión antes de evaporarse, lo que hace que cierta parte del agua acumulada bajo la planta desaparezca antes de que ésta pueda aprovecharla, reduciendo así la humedad con la que contaba la planta para nutrirse y se deba volver a regar de nuevo, por lo que es importante realizar las mediciones de humedad a diferentes niveles de profundidad, incluso algo más allá del punto más ahondado de las raíces. Si la temperatura del entorno es menor, ya sea por el clima o por la sombra que produzca una planta sobre otra, ese agua capilar podrá ascender hasta ella y ser absorbida. Este es el principal motivo por el que el control de la temperatura del entorno es tan importante y por lo que se tendrá en cuenta en la implementación del sistema final.

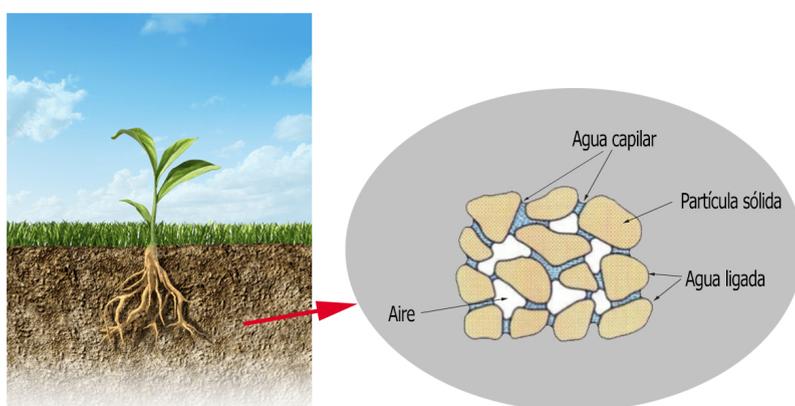


Figura 2.2: Tipos de aguas en el suelo

Esta humedad del suelo se puede medir de forma porcentual desde dos perspectivas diferentes: la masa y el volumen. Dado que se puede medir la masa relativa de la cantidad de agua con respecto a la masa formada por todas las partículas sólidas que forman la tierra pero también se pueden medir la cantidad de dichas partículas del agua con las de la tierra, se pueden definir una metodología gravimétrica y otra volumétrica, respectivamente, para medir la humedad del suelo. Además, puesto que ambas son porcentuales, existirán unos límites para los cuales, bien por defecto o bien por exceso, la cantidad de agua no puede sobrepasar, así pudiendo llegar a no existir o drenarse, estos límites son el 0% y el 100%. Por tanto, el sistema de medición debe estar calibrado para medir esa Capacidad de Campo como el valor máximo y el 0% como el Punto de Marchitamiento, pues llegará un determinado momento en el que el agua drenará y comenzará a desaparecer, previsiblemente nunca llegando a secarse el suelo de forma natural mucho más que el punto en el que la planta se vea en peligro.

## 2.2. Medición de la humedad en la tierra. Mercado actual

### 2.2.1. Introducción a la monitorización de la humedad

Desde el año 9500 a.C., tras el final de la glaciación del periodo Mesolítico, el ser humano deja de desplazarse continuamente por el planeta, dejando una vida nómada atrás para pasar a ser sedentario, es decir, comienza a formar los primeros núcleos de población en puntos geográficos muy localizados como ríos, montes, costas, etc. El principal motivo de esto se debe a uno de los descubrimientos más importantes de la historia: la agricultura. Gracias a la exploración de nuevas técnicas de domesticación de plantas y animales, se comienzan a desarrollar de forma independiente las diferentes culturas agrarias basadas en la recolección y almacenamiento de alimentos de las antiguas civilizaciones como Menfis (Antiguo Egipto) o Sumeria (Mesopotamia). Con ello, comienza a crecer y evolucionar la vida en sociedad, ligada a su hogar y oficio, y es así como surgen las diferentes las culturas y lenguas que se han ido propagando dentro de grandes imperios y de las que hoy día nos vemos impregnados en nuestra vida cotidiana. También se producen importantes avances tecnológicos, ya que tan solo unos siglos más tarde comenzaba la Edad de los Metales, lo que favoreció la construcción de nuevas herramientas de labranza y que desembocó en una verdadera revolución agrícola. Además, se innovó en cuanto a técnicas, pues se logró una mayor fertilidad de la tierra gracias a la desviación de pequeños afluentes para la irrigación de los cultivos (Figura 2.3). Esta agricultura colectiva provocó un gran crecimiento de las urbes, reuniendo cada vez más ciudadanos enfocados a mejorar las técnicas para lograr una mayor productividad de nuevas especies, como la rotación de cultivos, lo cual limitaba bastante la extensión de las explotaciones. Sin embargo, es más adelante en la historia, durante el auge del Imperio Romano, cuando surgen las primeras explotaciones privadas de cereales y la vid de grandes dimensiones para dar abasto a la exigente demanda de toda una población, los latifundios[3], por lo que crece la necesidad de controlar la humedad del suelo. Los romanos se preocuparon mucho por este aspecto e ingeniaron muchos métodos para transportar el agua como pueden ser los acueductos, canales, etc. Pese a ello, no había otra forma de monitorizar la humedad del propio suelo mas que observando el estado de la planta o palpando la tierra con la mano. Es por ello por lo que, desde entonces, se han ido desarrollando nuevos métodos en el entorno de la investigación de la ciencia y la tecnología para la monitorización de esa humedad del suelo.

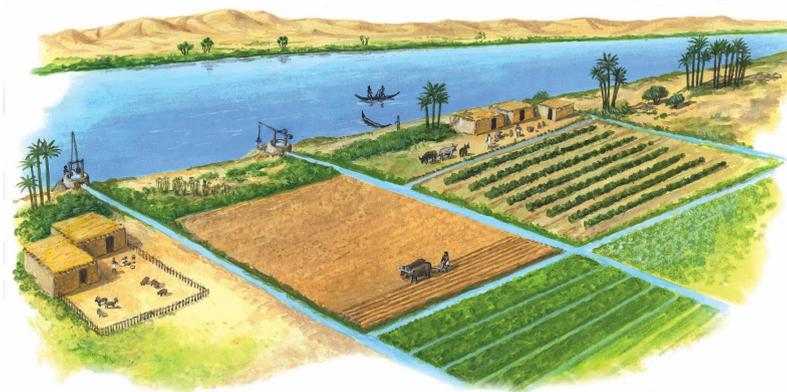


Figura 2.3: Técnica de irrigación en Mesopotamia

### 2.2.2. Métodos de medición de la humedad y evolución

A continuación se muestran algunos de los métodos existentes más relevantes para la obtención de un valor de humedad en la tierra[4] más preciso a modo de contraste para los sensores de humedad *IoT* en los que este proyecto se centra y que se analizarán. Estos, como ya se mencionó, se dividen en gravimétricos, cuando buscan conocer la masa exacta de la humedad; y volumétricos, cuando calculan el volumen que ocupan en el suelo.

#### Método gravimétrico

Una forma muy sencilla y precisa de medir la cantidad de humedad que hay en la tierra de forma directa es a través del método gravimétrico. Como bien su etimología indica, consiste en la medición de las masas del agua y de la tierra para la definición de la humedad en el medio en términos porcentuales (Ecuación 2.1). Obteniendo una muestra del suelo no rocosa, puede obtenerse la masa total de la suma de tierra y de agua. Si esta misma muestra se introduce en una estufa de laboratorio (Figura 2.4) a unos 105°C y se comprime para eliminar toda humedad se obtiene la masa exclusiva de la tierra, por lo que si realizamos la relación entre la diferencia entre las masas obtenidas menos entre esta última da como resultado la humedad porcentual, definiéndose así de la siguiente forma:

$$\text{Humedad}(\%) = \frac{m_{\text{húmedo}} - m_{\text{seco}}}{m_{\text{seco}}} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Sin embargo, el problema de este método es que no se realiza en tiempo real, sino que requiere algo de tiempo para su elaboración a diferentes niveles del suelo y el posterior análisis y cálculo. Además, es algo costoso ya que requiere de la estufa de laboratorio para que ese tiempo de muestreo no sea muy largo ya que el estado de la humedad en la tierra podría cambiar mientras tanto si se deja secar de forma natural.



Figura 2.4: Estufa de laboratorio con muestras de tierra

### Método tensiométrico

Para este método de aproximación se utiliza lo que se denomina como tensiómetro (Figura 2.5), que mide el esfuerzo que ha de realizar la planta para absorber el agua del suelo, actuando como una raíz artificial. Se trata de un sistema volumétrico analógico sencillo y rápido de instalar muy extendido entre agricultores. Consiste en un tubo con terminación en una cápsula microporosa de cerámica que impide la entrada y la salida del aire. Éste a su vez se conecta a un manómetro por medio de un pequeño tubo para medir el nivel de sometimiento a carga hidráulica negativa. Esta cápsula, una vez llenada con agua no oxigenada, se introduce verticalmente en la tierra para que establezca un equilibrio con la humedad de su exterior. En el caso de que la cantidad de agua de la tierra disminuya, el agua de la cápsula fluirá hacia fuera, originando así una mayor tensión, lo que indica mayor esfuerzo y por tanto menor nivel de humedad. En cambio, si la humedad de la tierra aumenta, la cápsula succionará ese agua hacia su interior, disminuyendo la tensión. En el manómetro se establece, previo estudio de las características del terreno, una curva de calibración con los distintos niveles de humedad en función del tipo de suelo, desde el más seco (0.8 bars) hasta el más húmedo por saturación (0 bars). Su lectura indica la presión en la cápsula menos la diferencia de presión que se produce entre los extremos del tubo principal a causa del agua, siendo más alta cuanto menor humedad exista, lo que indica que le costará más a la planta absorber el agua.



Figura 2.5: Tensiómetro

El principal problema de este sistema viene con la temperatura, pues el agua en su interior se contrae o se expande en función de ésta, lo que puede dar como resultado datos irreales sobre la humedad, como por ejemplo en invierno, pues el agua se puede congelar. El aire acumulado en su interior y la precisión del manómetro hacen que el sistema sea aún menos exacto, lo que condiciona su uso como simple indicativo. Es por ello por lo que se requiere de un mantenimiento frecuente. Tampoco es capaz de medir a diferentes niveles del suelo, lo que obliga a emplear tensiómetros de diferentes profundidades en un mismo punto, lo que encarece mucho el coste final, sobretodo cuando la extensión del terreno es muy amplia.

### Método neutrónico

Con este método volumétrico se indica la cantidad de agua por unidad de volumen de tierra mediante una sonda de unos 4 centímetros de radio y 40 centímetros de largo, revestida de plomo y parafina por motivos de seguridad, y colocada bajo la superficie del suelo a la profundidad deseada a través de una tubería vertical previamente instalada sin compactar el suelo. Dentro de esta sonda se ubica una fuente compuesta por un material poco radiactivo (aproximadamente 100 milicurios), normalmente amerícium-241 y berilio

finamente pulverizado, que emite un flujo de neutrones rápidos de muy poca masa durante un determinado tiempo con el fin de que éstos colisionen con los átomos que forman el suelo (Figura 2.6). Cuando los neutrones choquen con los átomos de hidrógeno, también de masa atómica muy pequeña, verán reducida su velocidad. El choque con otros tipos de partículas de mayor masa apenas afectará a la velocidad del neutrón, lo que lo hace bastante preciso. Por tanto, cuando estos neutrones atraviesen la capa de tierra hasta llegar a una placa contadora introducida dentro del mismo tubo de forma paralela a la sonda, en función del número de neutrones lentos detectados de forma térmica por el paso de energía cinética a calor, el sistema cuantificará de forma electrónica la medida de la humedad. Dado que en la composición de la tierra pueden encontrarse otras sustancias relacionadas con moléculas de hidrógeno como abonos, fertilizantes, etc; es muy importante realizar una medición previa con el suelo completamente seco para su calibración.

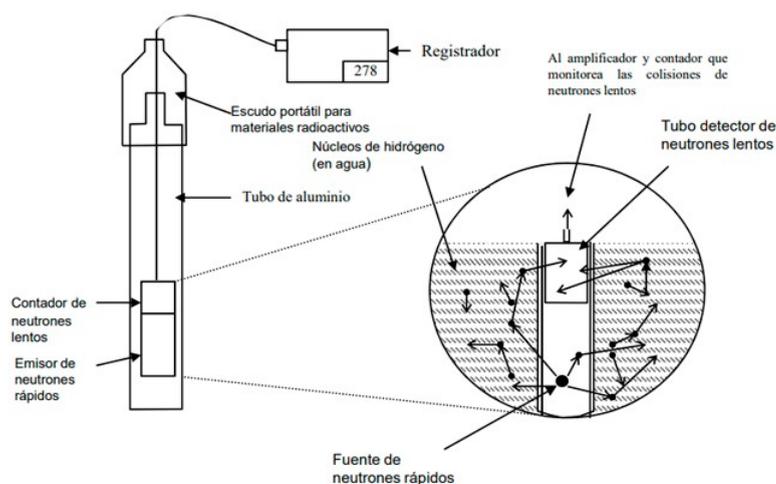


Figura 2.6: Sistema de atenuación de neutrones

Este método es muy eficaz ya que la temperatura apenas afecta en los resultados, siempre y cuando se instale y calibre correctamente y se establezcan periodos normalizados debido a la aleatoriedad de los choques. Sin embargo, pese a que se puede desplazar de un punto a otro con tubería, su coste es demasiado elevado.

### Método de atenuación de rayos gamma

Otro método muy similar al anterior es el de atenuación de rayos gamma, solo que en lugar de emplear neutrones se usan fotones. Consiste en transmitir los fotones desde una sonda protegida, en cuyo interior se suele emplear cesio-137, hasta un receptor que detectará dichos rayos gamma. A medida que atraviesen la tierra, sus velocidades se verán afectadas por un decrecimiento exponencial que depende principalmente de la densidad aparente del suelo, y con ello de su tipología; y del agua contenida en el mismo. Si se conoce la densidad aparente del suelo seco con un estudio previo, se puede obtener directamente el valor de la humedad volumétrica del suelo.

El problema de este sistema, además de su alto coste, es la variación de la densidad aparente, sobretodo en terrenos muy extensos, lo que puede confundir los resultados. También se trata de un método bastante más peligroso y requiere de expertos. Por ello, ambos métodos se suelen combinar en el laboratorio y no directamente sobre el terreno, lo que conlleva más tiempo.

### Métodos dieléctricos

Existen otros métodos volumétricos basados en la permitividad o constante dieléctrica,  $\epsilon$ . Esta permitividad depende directamente del medio y expresa cuantitativamente el grado de afección por un campo eléctrico. La permitividad del vacío ( $\epsilon_0$ ) es  $8.8541878176 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2$ . El valor de la permitividad absoluta de cualquier medio material vendrá dado por este valor multiplicado por un coeficiente relativo al medio, cuanto mayor sea éste menor será la velocidad de propagación del campo eléctrico. Por este motivo, influye en mayor medida el agua en este parámetro haciendo variar esta permitividad relativa, por lo que se puede conocer la cantidad de humedad en el suelo en función de su valor. Estos métodos son dos:

- Método de Reflectometría en el Dominio Temporal (RDT):** Se mide el grado de reflexión de una microonda[5] a través de una serie de guías de onda verticales, normalmente 2 ó 3 de entre unos 15cm y 60cm de largo, conectadas en su extremo superior a un cable coaxial sobre la que se generarán pulsos de una amplitud determinada (Figura 2.7). Estas guías están acabadas en corto en su terminación, donde están expuestas a la impedancia de carga de la tierra a la que se acopla la guía, por lo que se podrá determinar el nivel de humedad mediante un sensor electrónicamente calibrado que recogerá y procesará los resultados. Como bien su nombre indica, se mide de forma cronometrada la diferencia de tiempo ( $\Delta t$ ) entre la emisión del pulso y la recepción del pico de la onda reflejada ya que esta carga final afectará a su velocidad de propagación. La fórmula con la que se mide es la siguiente:

$$\epsilon = \left( \frac{c \cdot \Delta t}{2L} \right)^2 \left( \frac{F}{m} \right) \quad (2.2)$$

donde  $c$  es la velocidad de propagación de la luz en el vacío y  $L$  la longitud de la guía.

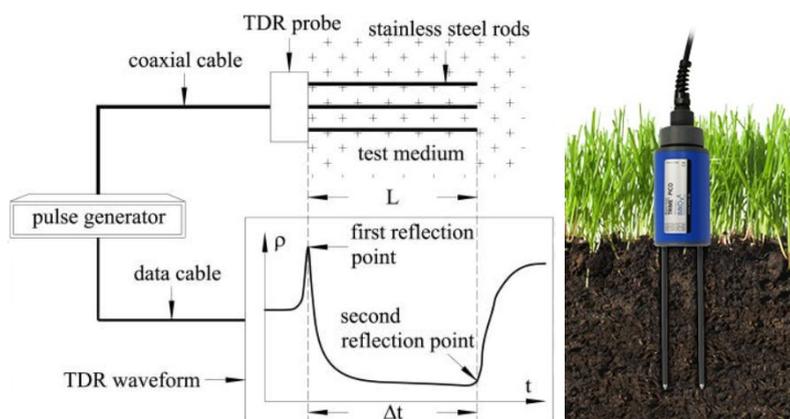


Figura 2.7: Esquema de funcionamiento dispositivo RDT

También se mide la amplitud pico de los pulsos tras su reflexión al final de las guías. Cuando su amplitud se haga menor en relación al pulso emitido significará que la permitividad ha aumentado y, por tanto, la impedancia de carga de la tierra ha disminuido, lo que indica que hay un mayor acoplo entre ambos medios y avisará de que el nivel de humedad en la tierra ha decrecido. Finalmente, se promedian los valores obtenidos de las guías.

- Método de Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (RDF) o de capacitancia:** Se emplean dos electrodos esmaltados (Figura 2.8) que, mediante un oscilador electrónico que genera una corriente variable, se mide esta constante dieléctrica a través de la capacitancia del sistema, la cual es directamente proporcional a esta permitividad dieléctrica que se busca hallar, pues la tierra se comporta como un dieléctrico (Figura 2.9). El cambio de los valores de tensión y frecuencia indican el cambio de la humedad en el suelo, pues cuanto mayor sea el agua contenida, mayor será la capacitancia que reducirá el voltaje. Esto puede verse mediante la siguiente ecuación:

$$C = \epsilon \cdot \frac{S}{d} \quad (F) \quad (2.3)$$

donde  $S$  es la superficie de los electrodos y  $d$  la distancia entre ellos.



Figura 2.8: Dispositivos RDF

Se ha de tener especial cuidado con el área de influencia que abarca el campo eléctrico generado ya que los electrodos no están enfrentados, midiendo así la permitividad de un mayor volumen del suelo para mayor exactitud. Por último, estos sensores no han de confundirse con los resistivos pese a su gran similitud en apariencia de muchos modelos.

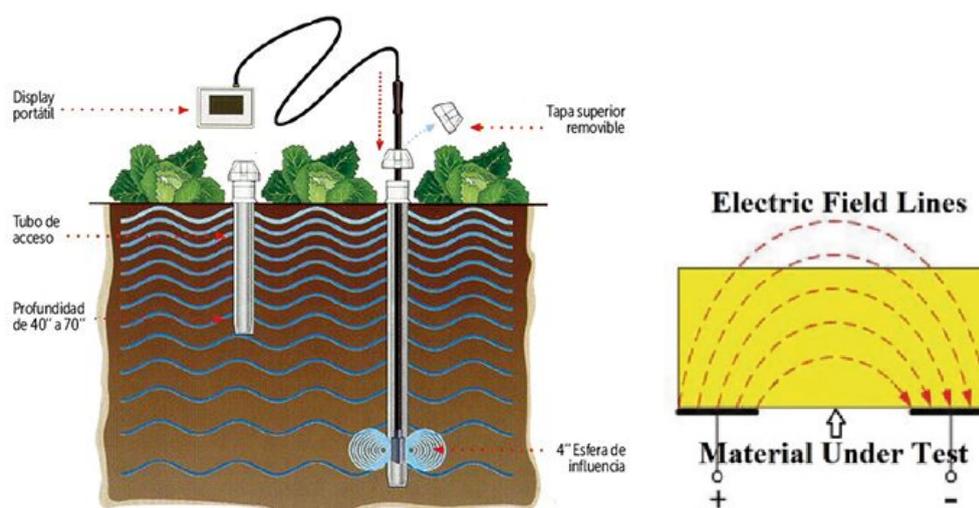


Figura 2.9: Campo eléctrico generado por dispositivos RDF

La principal ventaja de estos métodos es el menor coste que supone su adquisición, sobretodo el de RDF, aunque el gran número de variables que influyen en su resultado los hace algo menos precisos que otros métodos.

### Método de Wenner o resistivo

Se trata de un método basado en la impedancia resistiva característica del medio. Consiste en dos láminas metálicas enterradas directamente bajo la tierra a la profundidad deseada (Figura 2.10). Empleando un generador de corriente continua se puede determinar el valor de esta resistencia midiendo el valor de la tensión de salida entre ambos extremos. Cuanto mayor sea el valor de la humedad existente en el suelo menor carga se opondrá a la circulación de electrones por el sensor, favoreciendo así el paso de corriente.

El gran problema de este método es, además de su escasa precisión debido a la gran cantidad de elementos que conforman el suelo, sobre todo cuando el nivel de humedad es bajo; la gran corrosión que sufre el metal de la mayoría de modelos por oxidación al estar sus planchas metálicas en contacto directo con el agua, lo que lo hace un sistema ineficaz a largo plazo y su sustitución puede elevar mucho el coste. Existe equipamiento optimizado y de mucha mayor precisión, pero su coste es también bastante más elevado.



Figura 2.10: Sensores resistivos

### Método de luz infrarroja

En este otro método se mide la temperatura de las hojas del cultivo, pues las plantas transpiran a través de los estomas para mantenerse frescas. Sin embargo, cuando éstas comienzan a sufrir estrés hídrico, cierran sus estomas para dejar de transpirar y perder esa humedad, por lo que su temperatura comienza a aumentar. Una cámara de infrarrojos detecta la temperatura de las plantas (Figura 2.11) y registra cuándo una planta sufre estrés hídrico en mayor o menor medida debido a la falta de agua.

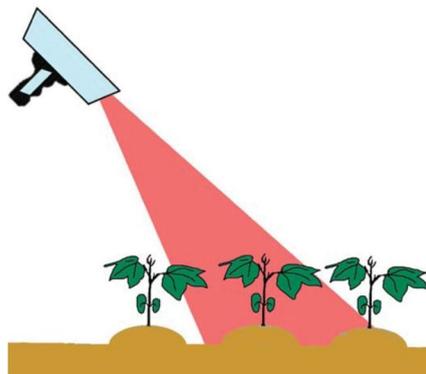


Figura 2.11: Sensor de infrarrojos

El problema de este método es que se debe conocer muy bien un estado óptimo del cultivo para contrastar su estado actual ya que no se está midiendo la humedad de la tierra sino el comportamiento de las plantas, el cual puede ser muy distinto entre especies a diferentes temperaturas. Cabe también la posibilidad de que el suelo se encuentre húmedo pero la planta sufra estrés hídrico debido a la radiación solar.

En la Tabla 2.1 se puede ver una comparación generalizada entre los métodos anteriores. En ella se contrastan todos los métodos de una forma más subjetiva a través de la información encontrada al respecto en algunos artículos e informes y sus valores de mercado. Se compara por tanto las características más relevantes para su adquisición y uso como son el precio de todo el sistema, su eficacia, la digitalización, la durabilidad y si se mide o no en tiempo real.

| Método                  | Coste     | Eficacia | A/D       | Duración | T.R. |
|-------------------------|-----------|----------|-----------|----------|------|
| Gravimétrico ( $m$ )    | Muy bajo  | Muy alta | Analógico | Alta     | No   |
| Tensiométrico ( $p$ )   | Medio     | Media    | Analógico | Alta     | Sí   |
| Neutrónico ( $E$ )      | Muy alto  | Alta     | Digital   | Alta     | Sí   |
| Rayos $\gamma$ ( $E$ )  | Muy alto  | Alta     | Digital   | Alta     | No   |
| RDT ( $\epsilon, v_p$ ) | Medio     | Alta     | Ambos     | Alta     | No   |
| RDF ( $\epsilon, C$ )   | Muy bajo  | Alta     | Analógico | Media    | No   |
| Resistivo ( $R$ )       | Muy bajo* | Media    | Ambos     | Baja     | Sí   |
| Luz IR ( $T$ )          | Medio     | Baja     | Digital   | Alta     | Sí   |

\* La mayoría de los modelos son de muy bajo coste

Tabla 2.1: Contraste entre métodos de medición de humedad del suelo

### 2.2.3. Propuesta de ensayo

Como se ha mencionado anteriormente, se pretende emplear alguno de los métodos anteriores para realizar la experimentación del sistema de bobinas propuesto de una forma más contrastada. Con ello, se puede conocer un valor de humedad más cercano al real para así establecer los rangos de trabajo de los parámetros del sistema a implementar a través de la experimentación. A partir de la anterior tabla comparativa (Tabla 2.1) se ha realizado una reflexión sobre la viabilidad de cada uno de ellos, valorando cada una de sus características. Es por ello por lo que, debido a su gran eficacia y bajo coste, el método gravimétrico puede ser la opción más asequible por su bajo coste en el supuesto de no utilizar estufa de laboratorio, pues no es necesario que se realice en tiempo real.

Con la Ecuación 2.1 se puede llevar a cabo una experimentación en la que medir esa humedad en términos porcentuales en función de las masas del agua y de la tierra. Para ello, se puede emplear un recipiente con drenaje, en el que se introducirá una masa determinada de tierra seca y se pesará en su conjunto para obtener así la masa de la tierra. Esta primera medición corresponderá a la del 0% de humedad. Posteriormente, a éste se le irá añadiendo agua y controlando el peso del sistema a la vez que se van anotando los resultados de tensión inducida obtenidos para cada valor de humedad. Este proceso se realizará hasta que se logre el doble de la masa inicial, es decir, que las masas de la tierra y el agua sean iguales para que el cociente de humedad quede del 100%. De esta forma se podrán comprobar los valores que el sensor ofrecerá a medida que la humedad cambie.

### 2.2.4. Sensores competidores accesibles en el mercado actual IoT

Es muy importante que parte de la investigación para el desarrollo del sensor basado en bobinas se enfoque precisamente en estudiar otros tipos de sensores de humedad del suelo para el sector *IoT*, en el que se centra el proyecto, y que se puedan adquirir en el mercado por un precio razonable. Por este motivo, se desarrolla a continuación la Tabla 2.2 con la comparativa de algunos de los modelos predominantes en el comercio *online* con el tipo de sensor y su rango de precios encontrados en el momento de realizar este proyecto en dominios web de productos de bajo coste y al por mayor que operan en Europa como son *Amazon*, *AliExpress/Alibaba*, *Banggood*, o *Ebay*.

| Modelo       | Tipo       | Precio/unidad | Conexión   |
|--------------|------------|---------------|------------|
| XH-M214      | Resistivo  | 2.5-12€       | 1.25mm     |
| AM2315       | Capacitivo | 12-27€        | I2C        |
| SZ2801C      | RDT        | 170-190€      | ZigBee     |
| HD-38        | Resistivo  | 3-30€         | 1.25mm     |
| SHT20        | Capacitivo | 15-20€        | I2C        |
| YL-69        | Resistivo  | 0.5-2€        | 1.25mm-I2C |
| FC-28        | Resistivo  | 0.2-2.5€      | 1.25mm-I2C |
| SoilWatch 10 | Capacitivo | 15-26€        | Cableada   |
| CSMSv1.2     | Capacitivo | 2-15€         | I2C        |

Tabla 2.2: Comparativa entre sensores de humedad del suelo en el mercado

Como se puede apreciar en la Tabla 2.2, en el mercado actual de sensores *IoT* de humedad para la tierra destacan aquellos basados en la resistencia y la capacidad eléctrica de la tierra debido principalmente a su menor coste por unidad, lo que permite la instalación de múltiples sensores distribuidos a lo largo de un terreno de cultivo y a diferentes profundidades del suelo. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente con el método resistivo, la mayoría de estos sensores acarrearán problemas de eficiencia debido a la fácil oxidación de las placas metálicas expuestas de forma directa a la humedad de la tierra, lo que los hace totalmente inviables en entornos de mayor superficie. Otros sensores no predominantes como aquellos basados en RDT tienen un coste por unidad muy elevado, lo que coloca a los sensores capacitivos (RDF) cubiertos de un esmalte protector anticorrosivo (Figuras 2.8 y 2.12) como los más rentables gracias a su reducido coste para una buena eficacia, incluso en los casos con condiciones más difíciles para los sensores como son las zonas secas, en las que sus valores de salida son más inestables. Estos generan una señal cuadrada a través de un circuito integrado 555 con la que carga y descarga esa capacitancia que produce la tierra, lo que eleva un poco más su coste a cambio de un mejor funcionamiento que el resistivo.

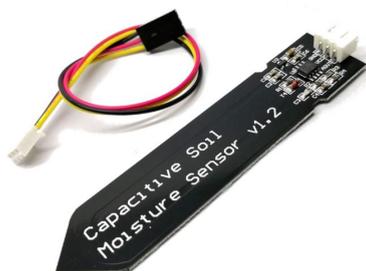


Figura 2.12: Sensor capacitivo más comercializado (CSMSv1.2)

Estos sensores cuentan con una gran comunidad detrás desarrollándolos, tanto a nivel hardware, tratando de mejorar la precisión con la que toma los datos de una forma más eficiente; como software, compartiendo en repositorios de Internet un gran número de recursos entre los que se pueden encontrar las librerías de código abierto que permiten su fácil control para la toma de muestras de la humedad del suelo a través de interfaces de programación como *Arduino IDE*, *PlatformIO*, *Visual Studio*, etc. Es principalmente por esta razón por la que estos modelos están tan extendidos dentro del sector de desarrollo *IoT*. Por lo tanto, si se pretende llegar a competir contra dicho producto, es muy importante que la exactitud de las muestras sea muy alta y el precio de venta sea mucho más reducido para así calar más en usuarios potenciales.

## 2.3. Inducción electromagnética en bobinas

Para comenzar a comprender el entorno que rodea al proyecto en mayor profundidad, el estudio se centra ahora en el comportamiento de las bobinas que se emplearán para la experimentación.

El principio elemental en el que se basa el sensor propuesto es la inducción electromagnética que se produce entre dos bobinas: una primaria, sobre la que actúa un sistema generador de corriente; y otra secundaria, en la que se induce esa misma corriente afectada por las condiciones del medio, la cual se pretende analizar; y las características físicas de ambas bobinas.

### 2.3.1. Principios de inducción electromagnética

Esta inducción electromagnética fue descubierta por el físico británico Michael Faraday en el año 1831. Su experimento se basó en una espira circular de un material conductor conectada en sus extremos a un galvanómetro. En el interior de esta espira comenzó a introducir un imán de forma perpendicular a la superficie formada por la espira y vio cómo el galvanómetro indicaba la existencia de una pequeña corriente momentánea en un sentido u otro en función de la dirección en la que introducía dicho imán y que hoy se puede distinguir por la regla de la mano derecha. A partir de los conocimientos ya publicados sobre la relación tan ligada entre electricidad y magnetismo, pues Ørsted ya había demostrado que los electrones en movimiento a velocidad constante generan un campo magnético constante que varía con la distancia y que más tarde Ampère cuantificó; Faraday había logrado producir energía eléctrica a partir de energía magnética. Se demostró por tanto que, a partir de la variación de un flujo magnético, se podía incitar de forma proporcional un voltaje inducido o fuerza electromotriz[6] (*f.e.m.*,  $\epsilon$ ) sobre un material conductor de un circuito cerrado y viceversa, generando una alteración del campo magnético en el medio mediante una corriente generada por la impedancia de la propia espira (Ley de Ohm[7]) como más tarde se demostraría. Gracias a este experimento, Faraday comenzó la senda por la que se convirtió en el precursor del motor eléctrico tras hallar que el campo magnético generado por una corriente es de naturaleza pseudocircular, convirtiendo así la energía eléctrica en energía mecánica y sentando la base de la Ley de Lorentz[8] con la fuerza magnética, la cual se calcula como producto vectorial entre el sentido del campo magnético y el sentido de la corriente. También lo haría posteriormente con los generadores eléctricos para el suministro de electricidad de una forma más eficiente.

Con ello, dependiendo de los parámetros que caracterizan el medio así como del material conductor que construye la espira, se puede generar la variación de un flujo magnético a partir de una corriente variable que circula a través de una espira y que éste a su vez provoque otra corriente proporcional a la primera sobre otra espira formando un circuito cerrado independiente del primero, es decir, sin que estén en contacto, siendo éste el principio fundamental de inducción electromagnética con el que trabajan los transformadores eléctricos en la actualidad. Cuanto mayor sea esa variación de la corriente, es decir, más abruptamente se produzca el cambio de intensidad en el conductor, más rápida será la variación del flujo magnético y, por tanto, mayor será la tensión inducida o *f.e.m.*, tal y como se define en la Ley de Faraday[9] con la Ecuación 2.4.

$$\epsilon = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (V) \quad (2.4)$$

Para que esto ocurra, tal y como demostró posteriormente Heinrich Lenz a partir de los experimentos de Faraday, este flujo magnético originado por una corriente que circula a través de una bobina debe ser variable con respecto al tiempo ya que existe un campo magnético que se opone a este cambio al ser inducido por la corriente inicial por el principio de conservación de la energía[10], por lo que, de hacerse constante, lo anula y evita que la corriente siga incrementando o decrecentándose. Por tanto, de no existir dicha variación de corriente o de flujo magnético no habrá tampoco variación de flujo magnético o corriente, respectivamente[11]. Ocurre exactamente lo mismo entre las bobinas con  $N$  espiras, pues se trata de la misma construcción de un determinado número de espiras. Además, Lenz demostró que ese flujo magnético depende de la orientación del campo magnético variable con respecto a la superficie de la bobina (Ecuación 2.5), siendo mayor cuanto más extensa fuera la superficie de las espiras.

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (Wb) \quad (2.5)$$

Más tarde sería James Clerk Maxwell el encargado de unificar el conjunto de leyes electromagnéticas postuladas por Faraday, Lenz, Coulomb, Gauss y Ampère entre otros, en cuatro únicas ecuaciones[12] (veinte, originalmente) a partir de la reformulación de dichas leyes mediante modelos mecánicos y con el concepto de campo definido por Faraday. En ellas se establece la relación existente entre el campo eléctrico y el campo magnético, lo que hoy se conoce generalmente como campo electromagnético. Lenz demostró por tanto que cualquier onda electromagnética se propaga con dicho modelo por cualquier medio, vacío o material, incluidas las ondas de luz visible. En especial, por medio del teorema de Stokes, se transformó el rotacional del campo eléctrico como la negativa de la derivada de la inducción magnética con respecto al tiempo, como ocurre en la Ecuación 2.6.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.6)$$

Esto quiere decir que, si existe una variación en el tiempo del campo magnético  $\vec{B}$ , éste provocará la variación de un campo eléctrico  $\vec{E}$ , lo que origina a su vez una variación de la corriente opuesta en el caso de que el circuito esté cerrado, siendo ésta la corriente inducida. Por tanto, la fuerza electromotriz definida por Faraday y que indica la existencia de un campo eléctrico, en el caso de las bobinas, se puede medir como el producto del número de espiras ( $N$ ) por la variación temporal del flujo magnético (Ecuación 2.7).

$$\epsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.7)$$

A partir de esto, se puede plantear que sobre la bobina secundaria existirá, siempre y cuando haya una variación de la corriente a través de la bobina primaria, una fuerza electromotriz que actuará como una fuente de tensión originada por un flujo magnético que será mayor o menor en función de su orientación, el número de espiras, su superficie, el medio en el que se encuentra este campo magnético y la corriente primaria. Estos parámetros serán los que den paso al siguiente punto a considerar: la inductancia de la bobina.

### 2.3.2. Comportamiento de las bobinas. Inductancia

La inductancia[13][14][15], también conocida como autoinductancia, tal y como la definió Lenz, es la propiedad electromagnética que tienen las bobinas de oponerse a cualquier cambio de corriente que circula a través de ella. Esta inductancia ( $L$ ) se mide en Henrys y se ve caracterizada por el campo magnético inducido como la superposición de todas y cada una de las espiras que forman la bobina debido al paso de una corriente variable a través de ella (Ecuación 2.8) ya que el propio material conductor en la realidad, además de su componente resistiva, también tiene una componente inductiva, lo que hace que con el arrollamiento del cable se consiga una componente mucho más fuerte. De esta forma, la bobina se convertirá en un electroimán variable con un polo norte y un polo sur intercambiables en función de las corrientes por el cual las ondas del campo magnético inducido irán de una forma pseudocircular desde el polo positivo al negativo por fuera de la bobina y del polo sur al polo norte en su interior, como se puede ver en la Figura 2.13.

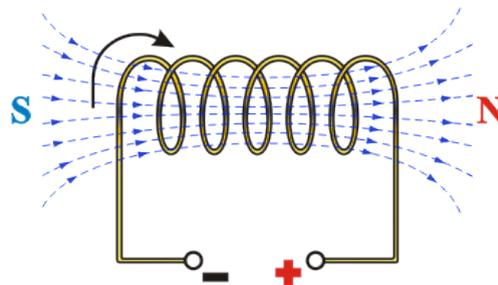


Figura 2.13: Campo magnético inducido en la bobina

De esta forma, por la Ley de Lenz, al existir una corriente variable con el tiempo que circula por una bobina en un sentido, se va a generar una variación del campo magnético que a su vez generará una corriente de sentido opuesto a la anterior, evitando así cambios discontinuos en la corriente que circula por la bobina (Ecuación 2.9). Cuanto mayor sea el valor de la inductancia, mayor oposición tendrá al cambio de la corriente. Esta inductancia puede caracterizarse mediante la Ecuación 2.8:

$$L = \frac{\Phi N}{I} = \frac{\mu N^2 A}{l} = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 \pi r^2}{l} \quad (H) \quad (2.8)$$

donde  $\mu$  es la permeabilidad magnética absoluta del núcleo,  $N$  es el número de espiras de la bobina,  $A$  es el área de la sección transversal de la bobina y  $l$  es la longitud de la bobina. Su valor se mide en Henrys.

De ello se deduce que, cuanto mayor sea el número de espiras por unidad de longitud del conductor y mayor sea el radio de ésta, mayor será la inductancia. Además, dependiendo del material que forme el núcleo de la bobina la inductancia se verá alterada. Por ejemplo, si en lugar de aire o tierra se introduce una lámina de hierro, dado que su permeabilidad magnética absoluta es mucho mayor, la inductancia será también mucho más alta, tal y como se presentan en los transformadores eléctricos con los núcleos de ferrita.

Cabe a mencionar que esta oposición a la variación de la corriente actúa como almacenamiento de energía en forma de campo magnético, lo que significa que cuando la corriente decrezca o se abra la fuente de alimentación, por dicho principio de conservación de la energía, la bobina seguirá suministrando corriente en el mismo sentido de forma continuada hasta descargarse dicha energía almacenada. Con este comienzo de descarga de energía se invertirá la polaridad de la bobina (Ecuación 2.9) como respuesta al cambio de corriente para evitar dichas discontinuidades, según Lenz siendo ésta de signo opuesto al de la corriente suministrada en las fases de descarga -y del mismo signo en las de carga-, lo que se denomina como fuerza contraelectromotriz (*f.c.e.m.*). Por tanto, si la corriente en el circuito tiende a descender, se recupera ese campo magnético para convertirlo en forma de corriente con esa *f.c.e.m.* y evitar que la corriente descienda de forma más abrupta, así sumándose en el mismo sentido a la corriente ya existente hasta agotarse. Se produce el efecto opuesto cuando la corriente comienza a fluir por la bobina, impidiendo así el crecimiento de la corriente en la bobina y transformando la corriente eléctrica en campo magnético. Esto implica que la bobina, mediante esta *f.c.e.m.* realiza un trabajo menguante contra la *f.e.m.* hasta alcanzar máximos o mínimos, dando como resultado dicho almacenamiento de esa energía como campo magnético.

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \quad (V) \quad (2.9)$$

Además, cuanto mayor sea la inductancia, mayor se hará la *f.c.e.m.*, impidiendo en mayor medida el ascenso de la corriente por la bobina y haciéndola más constante en su descenso, es decir, suavizando las curvas de cambio de la corriente. Por ello, en inductancias más pequeñas, a medida que el campo magnético alcance su valor máximo, la *f.c.e.m.* de la bobina se irá haciendo cada vez más pequeña, hasta hacer nula la inductancia de forma muy rápida y permitir que circule una corriente máxima, es decir, sin mucha oposición. Esto es lo que ocurre cuando la bobina recibe de forma instantánea un pulso de tensión, oponiéndose muy levemente a esta discontinuidad y permitiendo rápidamente circular la corriente máxima, hasta terminar el pulso y volver de forma diferenciada a un valor original tras su descarga. Para alcanzar este valor máximo de corriente en inductancias más grandes se necesitará un mayor tiempo para una misma señal de entrada debido a una mayor oposición al incremento de la corriente, lo que implica que, en el caso de señales periódicas de corriente variable, la frecuencia deba ser menor. Por ello, a mayor frecuencia, mayor variación del flujo y por tanto mayor reactancia inductiva ( $X_L$ ), como se puede ver en la Ecuación 2.10. De esta forma, a ciclos o periodos más cortos, lo que implica una mayor frecuencia, se reduce drásticamente la variación de la corriente y por ende la amplitud máxima de la señal, pues no se logra una fuerza electromotriz suficiente capaz de sobreponerse a la fuerza de oposición ejercida por la bobina. Si, por el contrario, esa inductancia se hace menor, para la misma señal se podrían ver picos de mayor amplitud.

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (\Omega) \quad (2.10)$$

Por las Ecuaciones 2.9 y 2.10, en el caso de que la corriente tienda a hacerse constante, al no variar, la tensión entre los extremos de la bobina se hará cero junto con la reactancia, actuando así como un cortocircuito. Si la *f.e.m.* es generada por una señal periódica de corriente alterna, este proceso se repetirá por cada ciclo. Es por todo lo anterior por lo que la corriente tiene un desfase de  $90^\circ$  con respecto a la tensión (Figura 2.14) pues, como se vio en la Ecuación 2.9, se produce el pico máximo de tensión entre los extremos de la bobina cuando la corriente es nula pero está creciendo de forma muy rápida, es decir, hay una mayor variación de la corriente; y el mínimo valor nulo de tensión cuando la corriente se hace cada vez más constante en su máximo, es decir, su variación es ínfima, dando lugar a dicho retraso de la corriente con respecto al voltaje. Este retraso de la corriente provoca además que el factor de potencia en circuitos con cargas inductivas se vea reducido ya que, para una misma potencia real de salida o de carga, el generador entrega una mayor potencia aparente al circuito ya que la bobina consume una potencia reactiva positiva, lo que obliga en muchos casos al uso de capacitancias para lograr que el factor de potencia se eleve para volver a acercarse al valor de 1, sobretodo para no penalizar el consumo en el sector industrial. Con señales periódicas en el tiempo la tensión media en la bobina es cero, por lo que el consumo de potencia media activa o real es también cero ya que la bobina se carga y descarga dentro del mismo ciclo. No ocurre lo mismo para señales aperiódicas, en las que en determinados ciclos la bobina puede consumir mayor potencia.

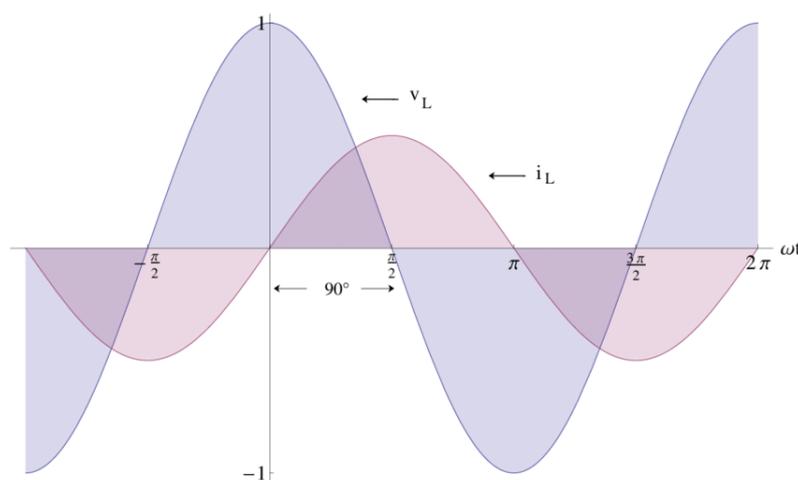


Figura 2.14: Desfase de  $90^\circ$  en retraso entre tensión y corriente en la bobina

Todo ello se refiere a lo que se denomina como autoinducción, es decir, cuando la diferencia de flujo magnético que se genera a partir de una corriente variable induce otra corriente opuesta sobre el mismo conductor. Sin embargo, también es posible que exista inducción entre diferentes bobinas, lo que se denomina como inducción mutua.

### 2.3.3. Inducción mutua entre bobinas

Una vez estudiadas las características de una bobina individual, se pasa a realizar un breve análisis acerca de la inducción de una bobina sobre otra, que es lo que se conoce como inducción mutua.

Como se ha mencionado anteriormente, la corriente que circula por una bobina induce un campo magnético a su alrededor. Cuando dicha corriente varía con respecto al tiempo, provoca una variación del campo magnético que, a su vez, por la variación del flujo,

provoca una corriente sobre el mismo conductor de la bobina en sentido contrario que evita un crecimiento o decrecimiento discontinuo de dicha corriente principal. Además, por este mismo diferencial de flujo magnético puede inducir una nueva corriente sobre otra bobina cercana. Al crearse esta nueva corriente que también variará en el tiempo, se volverá a generar un campo magnético opuesto al anterior, lo que alterará esa variación de flujo y provocará una corriente secundaria inversa en la segunda bobina y otra en la primera. De ser una señal periódica, la inducida adquirirá la misma frecuencia.

De la anterior explicación se podría entrar en un bucle en el que una bobina induce a la otra. Calcular dicho flujo total no es trivial. Sin embargo, debido al medio y a la distancia, pues el flujo magnético es vectorial; las líneas de campo magnético se hacen más débiles en el punto de la segunda bobina, lo que hace que, en función de su superficie, se induzcan corrientes y campos magnéticos cada vez más pequeños, algo que no ocurre en transformadores eléctrico al usar un marco ferromagnético que las canaliza, tal y como se analizará más en adelante con el comportamiento de la inductancia en función del medio. Es por ello por lo que el sistema se podría reducir a un flujo magnético que incide en una bobina de forma proporcional a la corriente de la otra bobina. Esa proporcionalidad se puede describir con un coeficiente  $M$  (Ecuaciones 2.11 y 2.12).

$$\Phi_{21} = \int_S \vec{B}_1 \cdot d\vec{S}_2 = M_{21}I_1 \quad (2.11)$$

$$\Phi_{12} = \int_S \vec{B}_2 \cdot d\vec{S}_1 = M_{12}I_2 \quad (2.12)$$

Este coeficiente, al igual que la inductancia, se mide en Henrios. Debido a este acoplamiento entre bobinas, se producirán alteraciones cruzadas en mayor o menor medida dependiendo de las características del sistema (distancia, medio material, corrientes, etc.). Como consecuencia de esta interdependencia, ambos coeficientes poseen el mismo valor, es decir, son iguales. Este valor es el de la inductancia mutua. Por tanto, esta *f.e.m.* inducida sobre la otra bobina se define de la mediante las Ecuaciones 2.13 y 2.14.

$$\epsilon_{21} = -M \frac{dI_1}{dt} \quad (2.13)$$

$$\epsilon_{12} = -M \frac{dI_2}{dt} \quad (2.14)$$

El signo negativo indica la situación de dos bobinas enfrentadas, por lo que los voltajes son opuestos. Su valor permitirá calcular la corriente que se inducirá en la bobina secundaria despejando en la Ecuación 2.15.

$$M_{21} = \frac{N_1\Phi_{21}}{I_2} = M = \frac{N_2\Phi_{12}}{I_1} = M_{12} \quad (2.15)$$

Dado que ese flujo magnético irá menguando hasta hacerse nulo debido a la distancia, la inductancia mutua y la corriente inducida pasarán a ser cero de no continuar ninguna *f.e.m.* variable en la primera bobina. Por tanto, la inductancia mutua depende de que exista variación en el flujo magnético por medio de una corriente variable en una o en ambas bobinas. Este aspecto es aplicable al resto de bobinas que se encuentran próximas a ésta, siendo así afectadas por líneas más débiles del campo magnético inducido. De esta forma,

en el sistema planteado, si se pretende medir la humedad a diferentes niveles del suelo, se deberá tener en cuenta este acoplamiento entre las bobinas primarias y secundarias entre los diferentes niveles, pero también entre las propias bobinas primarias, ya sea cuantitativo o al menos cualitativo durante la experimentación. Con ello, la tensión inducida entre los extremos de las bobinas, la *f.e.m.*, será la superposición de la autoinductancia de la Ecuación 2.9 junto con las Ecuaciones 2.13 y 2.14 de inducción mutua.

### 2.3.4. Caracterización de la inducción mutua en función del medio

El flujo magnético que incide sobre una bobina, dado que su forma y posición son fijas, depende directamente del campo magnético  $\vec{B}$  (Ecuación 2.16). Este campo magnético no es igual en todos los puntos del espacio, sino que se debilita conforme se va alejando tanto del plano como del eje de la bobina. Tampoco es igual en un punto a la misma distancia separado por un medio material u otro. Esta caracterización del medio material se hace mediante la permeabilidad magnética[16] ( $\mu$ ) que se ha citado anteriormente con la inductancia, la cual es la capacidad de respuesta a un campo magnético. En los medios materiales, su valor absoluto es el de la permeabilidad en el vacío multiplicado por un coeficiente relativo al tipo de material.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \frac{\mu_0 \mu_r N I r^2}{2 \left( \sqrt{r^2 + \left( \frac{L}{2} + d \right)^2} \right)^3} \vec{u}_r \quad (T) \quad (2.16)$$

Existen tres grupos en los que los materiales pueden ser clasificados:

- Ferromagnéticos: El valor de la permeabilidad magnética relativa es muy superior a 1. Son altamente permeables, lo que significa que pueden absorber parte del campo magnético y convertirse así en fuentes de canalización de campo magnético por la alineación de los dominios magnéticos en el sentido del campo por un tiempo prolongado, aunque de ser éste excesivo se podrían saturar y hacer que la bobina se comporte como un cortocircuito. Esto ocasiona que la intensidad de campo magnético sea mucho mayor en puntos más alejados de la bobina.
- Paramagnéticos o no magnéticos: El valor de la permeabilidad magnética relativa es aproximadamente (ligeramente superior a) 1. Favorecen en muy poca medida al campo magnético.
- Diamagnéticos: El valor de la permeabilidad magnética relativa es inferior a 1. Repelen de forma muy débil el campo magnético, así reduciendo la intensidad del campo magnético en un determinado punto del espacio.

Esto puede verse resumido en la gráfica de la Figura 2.15. Es por este motivo por el que el hecho de añadir un núcleo de un material ferromagnético como se hace con los transformadores eleva en gran medida esa inductancia y la intensidad de campo para lograr la menor cantidad de pérdidas, aunque también contribuirá o perjudicará otro medio material a sus líneas de campo a lo largo del espacio hasta llegar a la otra bobina, pero dado que el núcleo interior de la bobina es el punto de donde emanan todas las líneas de campo, será este punto donde más afecta la permeabilidad magnética.

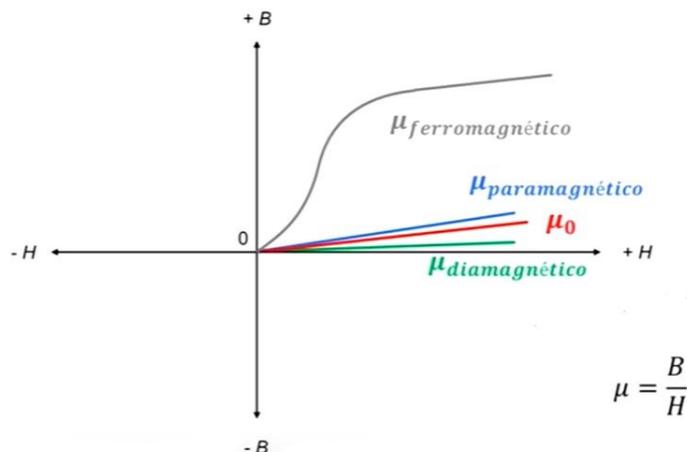


Figura 2.15: Permeabilidad magnética en función del tipo de material

La cuestión ahora es conocer qué tipo de material forma la tierra, ya que interesa que el medio sea lo menos ferromagnético posible para no tener ese problema que se mencionaba en el anterior punto sobre inducción mutua entre bobinas y así afectar en menor medida de lo posible a otras bobinas de los diferentes niveles del suelo. Este estudio de la composición de la tierra depende de múltiples factores como la zona geográfica, los minerales que se encuentran en su interior, el abono, pesticidas, etc. Sin embargo, dado que se pretende medir ese cambio de la permeabilidad magnética que modifique el valor de la corriente inducida, el estudio se centrará en la permeabilidad magnética del agua localizada principalmente en el núcleo de la bobina, pues es la mayor variable del proyecto, mientras que la composición de la tierra se relegará a una mera calibración en su instalación. Por este motivo, el valor de la permeabilidad global de la tierra no puede ser muy superior a la del agua ya que de lo contrario el sensor no será capaz de detectar apenas cambios.

La Universidad de Vigo, a través de su material didáctico sobre electromagnetismo[17], afirma que la permeabilidad magnética del agua destilada es de  $1.2566270 \cdot 10^{-6} N/A^2$  por lo que se trata de un material diamagnético al ser ligeramente inferior al valor unidad. Es por este motivo por el que si se acerca un imán a un material diamagnético lo repele, desviando el campo magnético sobre su superficie en función de su magnitud y reduciendo la intensidad del campo magnético al traspasarlo en parte. Este valor es muy similar al del vacío ( $1.2566371 \cdot 10^{-6} N/A^2$ ) y, por tanto, al del aire, por lo que el más mínimo movimiento de la tierra que haga oxigenar el compuesto que la forma afectará al sensor. Esto hace pensar que, cuanto más compacta sea la tierra en la que se introduzca el sensor mejores resultados aportará. Sin embargo, de normal, al no estar destilada y contener minerales, se obtendrán diferentes valores según su composición de sólidos en suspensión (cloruros, sulfatos, algunos metales no pesados, etc).

### 2.3.5. Inductores. Solenoides y toroides

Hasta ahora, para la definición de inductancia y sus propiedades se ha estudiado la bobina clásica de experimentación que usó Heinrich Lenz en sus ensayos, conocida como solenoide. Este solenoide se trata de un material conductor, normalmente compuesto por cobre, esmaltado para evitar cortocircuitos y arrollado sobre su propio eje para formar un determinado número de espiras. Sin embargo, el término de bobina o inductor[18], por

su naturaleza, abarca cualquier elemento pasivo formado por un hilo conductor arrollado capaz de almacenar energía en forma de campo magnético debido al fenómeno de la autoinducción. Es por ello por lo que existen diferentes formas físicas de implementar estos inductores de la forma más primitiva, ya que luego existen muchas variantes en cuanto a tipos de material, blindaje, rangos de frecuencia, usos, etc. Sin embargo, todos ellos tienen como objetivo controlar los saltos de corriente de la forma más eficiente posible.

En todos los casos, el hilo conductor se arrolla sobre un soporte (fijo o eliminable) hueco que adicionalmente puede ser rellenado con un material ferromagnético para aumentar el campo magnético que induce. Por el contrario, no todos ellos se arrollan de forma cilíndrica alrededor de un eje, sino que también puede realizarse de forma toroidal (Figura 2.16).

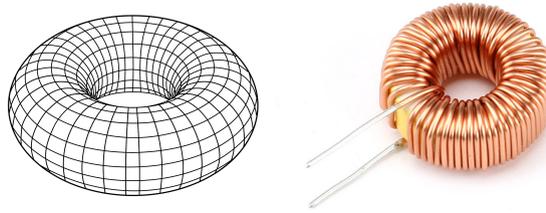


Figura 2.16: Bobina toroidal

Esto hace modificar las propiedades de la inductancia, así como del campo magnético generado, pues ya no existen dos terminaciones con planos perpendiculares al eje sino que ambas están unidas y la corriente que circula a través de ella lo hace generando un campo magnético uniforme encerrado en ella, con lo cual este tipo de bobinas no pueden inducir corrientes a otras salvo que éstas se encuentren en su interior, como es el caso de algunos transformadores toroidales. Este campo magnético se calcula con la Ecuación 2.17.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \frac{\mu_0 \mu_r N I}{2\pi r} \vec{u}_\phi \quad (T) \quad (2.17)$$

Esto hace que se pueda calcular el valor de su inductancia como en la Ecuación 2.18:

$$L = \frac{\Phi N}{I} = \frac{\mu N^2 A}{2\pi R} = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 r^2}{2R} \quad (H) \quad (2.18)$$

donde ahora  $r$  es el radio del cilindro que forman las espiras y  $R$  es el radio de la circunferencia que forma su eje con respecto al centro del toroide.

Su comportamiento como inductancia es muy similar al del solenoide. Sin embargo, para el caso del toroide, este campo magnético se almacenará de una forma mucho más eficiente al estar completamente encerrado en su interior, dando lugar a una mayor inductancia para una menor cantidad de material, aunque también es más complicado de lograr dado que el propio grosor del hilo enrollado de forma toroidal evita encerrar por completo dicho campo magnético, existiendo así pequeñas fugas a través de los pequeños huecos entre espiras. En el caso de que la corriente sea continua, ambos se comportarán como un cortocircuito dado que alcanzarán su máximo valor de corriente rápidamente tras el comienzo y se mantendrá constante hasta que se elimine o se conmute la *f.e.m.* que provoque esa corriente.

La agrupación de estas inductancias es muy similar a la de los resistores, siendo la inductancia total la suma de todos sus valores cuando están en serie y la inversa de la suma de sus admitancias cuando están en paralelo.

Anteriormente se mencionó que cualquier material conductor, además de su componente resistiva también posee una componente reactiva, que es la inductiva estudiada hasta ahora. Es por ello por lo que cualquier bobina real se representa como una bobina en serie o en paralelo con un resistor, según su tipo de bobinado y la frecuencia de trabajo. Esto provoca un comportamiento no ideal de la bobina, originando así una disipación de energía en forma de calor debido a esa resistencia. Sin embargo, también existe una capacitancia parásita (Figura 2.17) que crece con el número de espiras y se manifiesta a altas frecuencias debido a una capa muy fina de galvanizado sobre el conductor de la bobina que también afecte a este esquema, corrigiendo levemente el factor de potencia con desfases inferiores a los  $90^\circ$ . Con ello, tendremos el siguiente circuito equivalente:

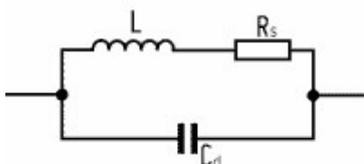


Figura 2.17: Modelo equivalente de una bobina real

Por este motivo se debe tener en cuenta la presencia de esta reactancia capacitiva parásita. A partir de la función de transferencia del esquema anterior, la corriente que circule por ambas componentes variará en función de la frecuencia, produciéndose un pico en la que se conoce como frecuencia de resonancia[19],  $f_r$  (Figura 2.18), aquella para la cual la corriente de realimentación que carga y descarga tanto a bobina como a condensador establece un equilibrio de atenuación y fase con respecto a la suministrada, pues en un caso real ante cualquier señal periódica, por la componente resistiva, iría reduciéndose con el tiempo. En cambio, al comenzar un nuevo pulso justo al final del periodo, se lograría evitar dicha atenuación, que es lo que se conoce como resonancia.

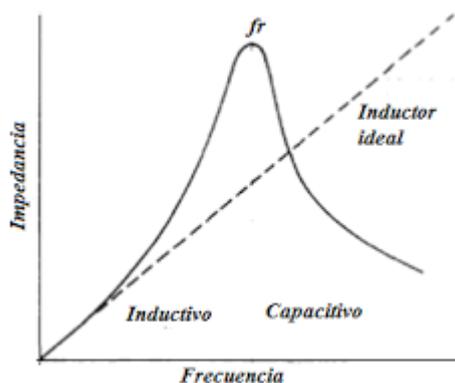


Figura 2.18: Comportamiento real de una bobina

Como se puede apreciar en la anterior gráfica, en el caso de un inductor ideal la impedancia reactiva crecería a medida que se incrementa la frecuencia, tal y como se vio en la Ecuación 2.10. Sin embargo, en el caso real se produce una mayor impedancia cuando la corriente que circula por la bobina lo hace a la frecuencia de resonancia, así con un comportamiento inductivo que se eleva sobre los valores ideales a frecuencias menores que ésta y con uno capacitivo con el que decae para frecuencias mayores debido a la existencia de un cero en la frecuencia nula y dos polos consecutivos. El hecho de que exista una

impedancia no reactiva (real) hace que ese valor de la reactancia inductiva de la bobina sea limitada y no infinita. El valor de esta frecuencia de resonancia se define mediante Ecuación 2.19.

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC_d} - \frac{R_s^2}{L^2}} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_d}} \quad (\text{Hz}) \quad (2.19)$$

Con este crecimiento con respecto a un comportamiento ideal a frecuencias más bajas que la de resonancia, el factor de calidad  $Q$  [20] también variará por la construcción de la bobina y la frecuencia, siendo así mejor a mayor valor por disipar menor energía a frecuencias por debajo de ésta, pues hasta ese punto la bobina se encuentra solamente en serie con una resistencia. Este factor  $Q$  indica el ratio de la reactancia inductiva con respecto a la resistencia en serie de la bobina real (Ecuación 2.20), lo que indica que esta  $Q$  depende directamente de la geometría de la bobina, tal y como se vio en la Ecuación 2.8. Por tanto, en esta frecuencia de resonancia se producirá el mayor pico de tensión entre sus extremos y, por tanto, de inducida. Además, considerando que el material conductor será homogéneo en todo su recorrido, esta resistencia depende directamente de la longitud, siendo mayor cuanto más largo sea el segmento.

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{2\pi f L}{R} \quad (2.20)$$

Dado que no se trabajará únicamente con una bobina sino con dos, la primaria y la secundaria, la frecuencia de resonancia común se verá desplazada por la superposición de cada bobina. Aquí es donde vuelve a aparecer el concepto de la inductancia mutua  $M$ , reemplazando así al valor de la autoinductancia de la primera bobina. Este nuevo comportamiento será el que se describa a través de la experimentación para hallar un consumo más eficiente de la energía y un rendimiento más optimizado. Se definirá así un factor de acoplamiento  $k$  proporcional a esa impedancia tal que  $M = k\sqrt{L_1 L_2}$ .

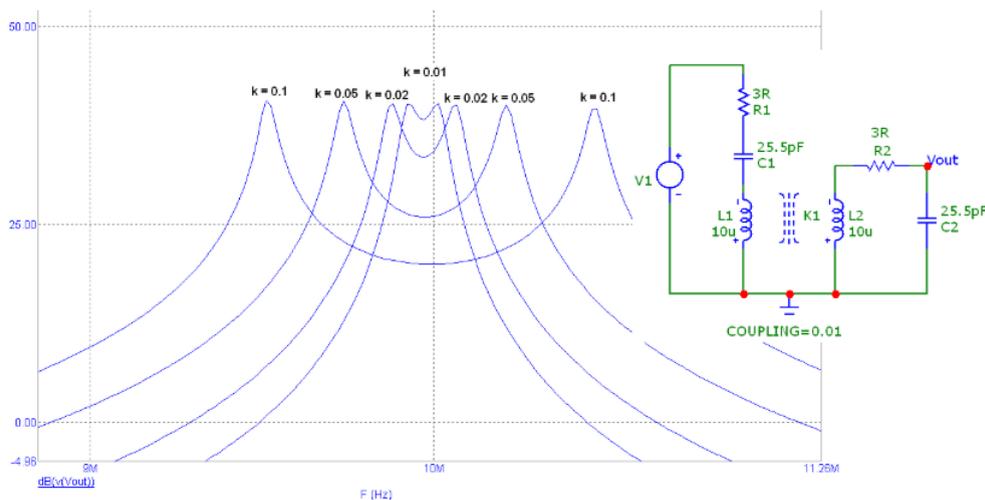


Figura 2.19: Resonancia con inducción mutua

Cabe a esperar por tanto que, con un alto acoplamiento entre las bobinas y en función de la inductancia de cada una, un pico se desplace hacia frecuencias muy inferiores hasta aquellas que se pueden localizar en el orden de los kilohercios (Figura 2.19). De lo contrario,

el pico se localizará en la  $f_r$  de la primaria. El valor de las inductancias así como la diferencia entre ellas también afectarán en la búsqueda de ese pico de resonancia.

### 2.3.6. Orientación a las bobinas experimentales

A partir de las ecuaciones anteriores junto con lo desarrollado previamente, se puede concluir este apartado de electromagnetismo con las siguientes deducciones a fin de comprender los resultados de modelar de forma experimental las bobinas que se emplearán en el proyecto:

- I. Cuanto mayor número de espiras tenga la bobina, mayor será la intensidad de campo magnético en un mismo punto (Ecuación 2.16).
- II. Cuanto mayor sea la relación del número de espiras en la bobina secundaria con respecto a la primaria, mayor será la corriente inducida. Además, cuanto mayor sea la corriente de la bobina primaria, mayor será el orden del campo magnético inducido (Ecuación 2.15).
- III. Cuanto mayor sea el radio de las bobinas, sobretodo el de la secundaria, mucho mayor será la superficie de ésta y por tanto mayor será el flujo magnético penetrante en la segunda bobina, con lo que la corriente inducida aumentará (Ecuaciones 2.5 y 2.16). Por tanto, también hará mayor la inductancia (Ecuación 2.8).
- IV. Para una misma geometría de una bobina, cuanto mayor sea su inductancia mayor será el campo magnético inducido (Ecuación 2.8). Por ello, cuanto más se aproxime el medio del núcleo a un material ferromagnético mayor será la intensidad de campo magnético y su alcance, lo que podrá afectar en mayor medida a las bobinas próximas a la primaria, incluidas otras primarias (Ecuación 2.16).
- V. Cuanta menor sea la distancia sobre el eje de la bobina al núcleo de ésta mayor será el valor del campo magnético, reduciéndose si se desplaza hacia algún lateral o se aleja (Ecuación 2.16). Por ello, debido a las líneas de campo magnético de una bobina comportándose como un electroimán, cuanto más cerca y más se enfrenten los extremos de las dos bobinas, la primaria y la secundaria, mayor afección tendrá el campo magnético sobre la segunda debido a una mayor intensidad de éste (mayor número de líneas).
- VI. El galvanizado, por no ser lo suficientemente denso, provocará la existencia de un efecto capacitivo en la bobina y establecerá así una frecuencia de resonancia que habrá que localizar mediante la experimentación entre las dos bobinas (Ecuación 2.19), pues interesa en todo momento mantener un comportamiento inductivo mutuo. Cuanto mayor sea el número de espiras, mayor serán la inductancia y la capacidad y, por tanto, menor la frecuencia de resonancia. Se busca evitar este efecto capacitivo para poder generar la señal de alimentación de la bobina primaria con un 555.
- VII. La bobina toroidal, por su campo magnético generado en su exterior nulo, no es una buena opción para la inducción que se pretende pues, aunque esté presente en ciertos transformadores, su construcción es inviable en este proyecto.
- VIII. Dado que el medio en el que se encuentran las bobinas se ve afectado por la presencia de agua, que es un medio material aparentemente diamagnético, la corriente inducida

decrecerá en proporción de la cantidad de agua que exista en éste (Ecuación 2.16). Interesa que sea lo más lineal posible. Además, la composición de la tierra hará variar el cálculo de la inductancia de la bobina con núcleo de aire.

- IX. En general, cuanto mayor sea la inductancia de la bobina primaria, mayor será la impedancia y por tanto, el voltaje inducido. Sin embargo, aumentar esta inductancia requiere que la fuente de alimentación sea de mayor amplitud y de menor frecuencia para mantener un mismo valor de corriente que circule por la bobina (Ecuación 2.9).

## 2.4. Red telemática basada en IoT

A lo largo de este documento se ha estado mencionando constantemente el término *IoT* para referirse a determinados sensores de humedad del suelo y la red de datos que los engloba pero, ¿qué es exactamente *IoT*?

### 2.4.1. Introducción a *Internet of Things*

*IoT* proviene del término inglés *Internet of Things*, cuya traducción literal al castellano es el *Internet de las cosas*. Este término se refiere en cuanto al conjunto de elementos físicos que se interconectan de forma «inteligente» a través de *Internet* para compartir datos, analizarlos e interaccionar entre ellos sin intervención humana, es decir, se produce una conexión máquina a máquina (*M2M*). Dichas máquinas abarcan desde los electrodomésticos más cotidianos involucrados en la domotización de una casa, como pueden ser el frigorífico, el sistema de calefacción central, etc; a importantes aplicaciones industriales como las del mantenimiento, control y monitorización de la cadena de producción. Esta conexión «inteligente» entre máquinas se produce gracias a una serie de protocolos de comunicación, bien sean alámbricos o inalámbricos, que han ido surgiendo hasta la actualidad. Sin embargo, todas ellas coinciden en su principal objetivo: compartir de forma eficiente información sobre su entorno para facilitar la vida a las personas de la forma más asequible posible, tanto a nivel económico como en lo que a consumo energético se refiere; así como en multitud de sectores (industrial, transporte, médico, etc). Es por esto por lo que la investigación tecnológica no solamente se ha centrado en los sistemas de interconexión entre máquinas, sino también del hardware integrado en ellas que se encargan de realizar esa tarea de interconexión con otro terminal. De ello surgen los circuitos integrados denominados *System on a Chip* o *SoC*, elementos de control de bajo consumo, reducidas dimensiones y bajo coste que, junto con el software adecuado que le permita manejar el sistema y esa conectividad con la que comunicarse con otros elementos, los hace un planteamiento idóneo para la masiva implementación de estos sistemas. Esto ha originado que el número de dispositivos conectados a la red haya crecido exponencialmente y ya existan ciudades enteras bajo el control de esta información, lo que se conoce como *smart cities*, pues ya se habla de la gestión de recursos, el control centralizado del consumo energético de los hogares, la regulación automática del tráfico, etc. También han surgido nuevos conceptos como la inteligencia artificial, entornos Cloud o el *Big Data* que han provocado la hiperconexión virtual entre todos los dispositivos, pudiendo así acceder a recursos externos comunes para así procesar más eficientemente la información y obtener una mayor accesibilidad a ella a través de la aplicación en cualquier momento y desde cualquier lugar del mundo.

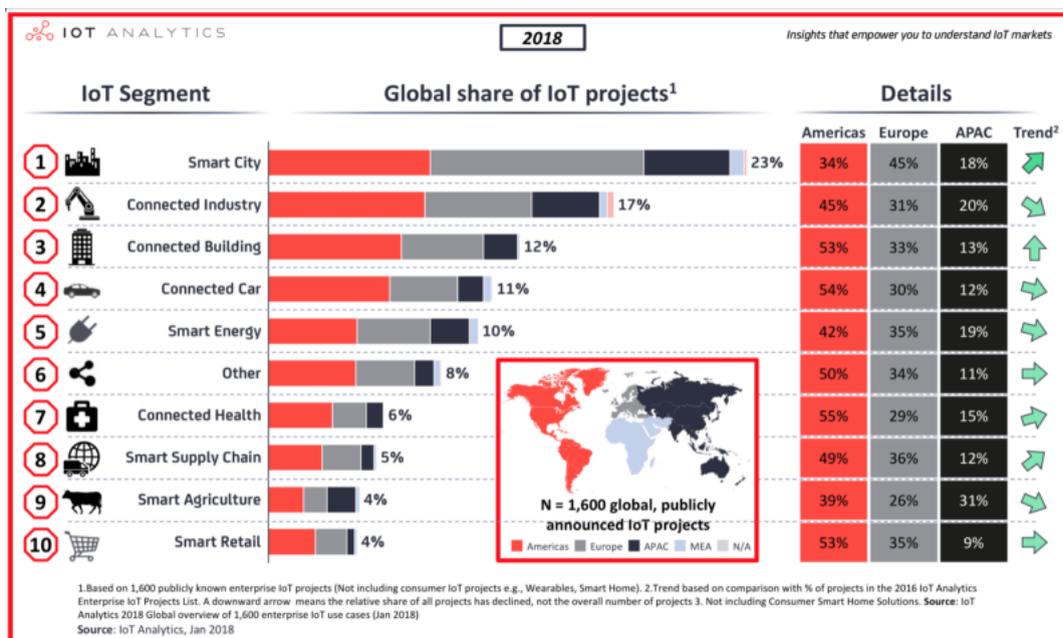


Figura 2.20: Análisis sobre el crecimiento de IoT por segmento y continente

Debido al gran avance tecnológico acontecido en los últimos años (Figura 2.20), unos sistemas han ido surgiendo y sustituyendo a los ya existentes con el fin de mejorar el rendimiento en el procesado de la información manejada. Es con ello por lo que el principal problema de esta revolución que ha afrontado el sector de las tecnologías de la información ha sido el gran número de empresas que han tratado de desarrollar su propio sistema de comunicación, pues muchos de estos proyectos se han quedado atrás debido a su entorno tan limitado a las políticas de la empresa y al nacimiento de otros nuevos proyectos con mayor éxito, pasando así a estar completamente obsoletos e inadaptables a un nuevo mundo que sigue expandiendo sus capacidades de interconexión como son la velocidad de transmisión, las distancias, etc. Esta exposición de las tecnologías al paso del tiempo ha obligado a numerosas empresas a adaptarse a los cambios mediante importantes inversiones económicas para la sustitución de los medios por otros más actualizados a la demanda. El gran temor de las empresas de verse en la misma situación a corto plazo y la necesidad de converger la conectividad de muy diversas máquinas de su entorno en una sola han provocado que hayan surgido los estándares que actualmente se conocen y sus *alliances*, que son todas aquellas organizaciones y empresas que apoyan oficialmente el proyecto para su continuo desarrollo. También la seguridad ha sido un factor determinante para el principal desarrollo de los estándares, pues en la mayoría de las empresas se tiene intención de proteger los datos sensibles de su sistema que se comparten en las comunicaciones, sobretodo en cuanto al control y la gestión de las máquinas. Estos estándares buscan la mayor eficiencia posible en un mercado tecnológico progresivo y la compatibilidad de nuevos sistemas con los ya existentes para lograr un mayor retorno de la inversión de las empresas, con lo que una gran mayoría de dispositivos se han acabado integrando en el ámbito de estas soluciones. No obstante, esto no quiere decir que todos se hayan centrado en una única tecnología, sino que existen múltiples estándares que pueden ser más o menos adecuados en función de las características de un proyecto.

Tal y como dijo Nikola Tesla en 1926, «cuando lo inalámbrico esté perfectamente desarrollado, el planeta entero se convertirá en un gran cerebro [...], y los instrumentos que

usaremos para ellos serán increíblemente sencillos comparados con nuestros teléfonos actuales, pues un hombre podrá llevar uno en su bolsillo». No es casualidad que la mayoría de estas tecnologías sean inalámbricas dado su bajo coste de despliegue, pues no es necesario invertir dinero en material conductor de altas prestaciones, pero también es cierto que el canal aéreo, por sus limitaciones y su legislado espectro de frecuencia, no ofrece las mayores prestaciones aunque sí las suficientes en muchas ocasiones. Debido a este menor coste de despliegue y mantenimiento que supone este proyecto al aire libre, expuesto por tanto a condiciones climáticas, se centrará el estudio exclusivamente a las tecnologías inalámbricas existentes en la actualidad para la telemetría de la humedad en el suelo y temperatura. Algunas de estas tecnologías inalámbricas se estudian a continuación.

### 2.4.2. Tecnologías inalámbricas basadas en IoT

Entre los estándares inalámbricos más utilizados en el sector *IoT*[21][22] están Bluetooth Low Energy (IEEE 802.15), ZigBee (IEEE 802.15.4), WiFi (IEEE 802.11), Sigfox, LoRa y aquellos basados en las tecnologías móviles, como es el caso de WiMAX (IEEE 802.16) o NB-IoT (5G). Existen muchas otras que, por su gran similitud con las estudiadas, se encuadran dentro de éstas. A modo de resumen de la investigación acerca de estas tecnologías se ha elaborado la Tabla 2.3 con las características generales más relevantes que permitirán tomar una decisión sobre qué tecnología puede aportar más ventajas en el proyecto para la transmisión de los datos de telemetría.

| Tecnología  | BLE      | ZigBee        | Sigfox    | LoRa     | WiFi     | WiMAX    | NB-IoT     |
|-------------|----------|---------------|-----------|----------|----------|----------|------------|
| Tipo de red | WPAN     | WHAN          | LPWAN-U   | LPWAN-U  | WLAN     | Móvil    | LPWAN-L    |
| Rango frec. | 2.4GHz   | 868MHz/2.4GHz | 868MHz    | 868MHz   | 2.4/5GHz | 10GHz    | 700-900MHz |
| Velocidad   | ≤2Mbps   | ≤250kbps      | ≤100bps   | ≤50kbps  | ≤300Mbps | ≤100Mbps | ≤62.5kbps  |
| Alcance     | ≤10m     | ≤100m         | ≤50km     | ≤40km    | ≤150m    | ≤70km    | ≤15km      |
| Latencia    | ≥10s     | ≥30ms         | 20-25s    | 1s       | ≥30ms    | ≥50ms    | 1-10s      |
| Consumo     | ≤0.5W    | ≤1mW          | ≤108mW    | ≤78mW    | ≥10W     | ≥80W     | ≤8mW       |
| Seguridad   | 128-AES  | 128-AES       | 128-AES   | 128-AES  | WPA2     | AES      | IPsec      |
| Nodos/gw    | 7        | 65000         | 1100      | 1000     | ≤45*     | ≤200*    | -          |
| Ruta        | Bidirec. | Bidirec.      | Unidirec. | Bidirec. | Bidirec. | Bidirec. | Bidirec.   |
| Coste       | Bajo     | Bajo          | Medio     | Bajo     | Bajo     | Alto     | Alto       |

\* Según la capacidad de conectividad del gateway con el exterior y con los hosts

Tabla 2.3: Contraste entre tecnologías inalámbricas IoT en Europa

### 2.4.3. Propuesta de desarrollo

Considerando las diferentes posibilidades listadas y comparadas se puede llegar a la conclusión fundamental de que no existe una tecnología mejor o peor, ya que su funcionalidad depende directamente del ámbito en el que se aplica, si se trata de entornos más cerrados en los que existen muchos obstáculos o si por lo contrario se realiza a campo abierto, la autonomía del sistema caracterizada también por su consumo, el coste que implica su despliegue, etc. Por tanto, la elección de una de estas tecnologías debe basarse en el caso concreto en el que se trabaja, pues es posible que se pueda declinar más la balanza hacia una tecnología en algunos casos y a una diferente en otros. Un ejemplo de ello es la distancia de cada uno de los nodos a su nodo principal, el *gateway* al que se conectan, pues es posible que en ciertos casos ésta sea tal que sea necesario descartar algunas de estas tecnologías. En el caso de un cultivo parece lógico pensar que las distancias entre estos nodos y los *gateways*, dado que se pueden encontrar en el hogar del agricultor o en

cualquier otra zona habilitada como punto de interconexión con la red, pueden ser muy largas, además de que la densidad de la vegetación o la propia extensión del terreno pueden también condicionar, sobretodo si se trata de una gran explotación o de una cooperativa agrícola. Por tanto, este principal condicionante hace descartar algunas de ellas de menor alcance como son BLE, RFID, Thread, Z-Wave, Zigbee o WiFi, las cuales son más adecuadas para entornos más domésticos. Otro aspecto muy importante es ese coste que implica el despliegue de los nodos, pues cuanto mayor sea su número y el precio por unidad más se encarecerá el proyecto. Dado que las tecnologías basadas en redes móviles, aunque poseen ese mayor alcance que se pretende, dependen de una gran infraestructura normalmente operada por compañías de telecomunicaciones, lo cual implica un coste adicional. El hecho de aplicar dichas tecnologías a un gran número de dispositivos hace menos viables tecnologías como WiMAX, Cat-M1, NB-IoT, etc.

Con todo ello, se puede buscar un punto intermedio en cuanto a rango y coste. Una gran opción encontrada ha sido el uso de tecnologías basadas en redes LPWAN-U (*Low Power Wide Area Network Unlicensed*) ya que no requieren de ningún tipo de trámite burocrático para adquirir cualquier licencia para el uso privativo del espectro radioeléctrico, lo que reduce mucho más su coste. La simplicidad de estas tecnologías abarata también el coste del hardware empleado. Además, como bien su nombre indica, tienen capacidad para distancias más amplias con un menor consumo de potencia, permitiendo así una mayor autonomía que puede llegar a durar años con el uso de baterías o de pequeñas placas solares, pues no requiere de conexión a una red eléctrica. Sin embargo, estas características limitan su funcionamiento a tasas más bajas de la transmisión de los datos, lo que impide enviar una gran cantidad de información a través de un mismo canal. Entre este tipo de redes inalámbricas de mayor alcance se encuentran LoRaWAN (red basada en LoRa) o Sigfox, las más extendidas hasta el momento. Debido a su mayor simplicidad, su mayor accesibilidad en el mercado a un menor coste, su bajo consumo de energía, su baja atenuación en campo abierto con una alta sensibilidad en la recepción y su mayor tasa de transferencia de datos bidireccional de baja latencia, LoRa será la tecnología inalámbrica que se utilizará en este proyecto para transmitir los datos sobre la humedad del suelo y de la temperatura en cada punto del cultivo a un sistema central.

#### 2.4.4. Tecnología estándar de LoRa

LoRa[23][24][25] (*Long Range*) es la tecnología inalámbrica de transmisión de datos a nivel de la capa física más utilizada en proyectos *IoT* de los últimos años. Esta tecnología fue desarrollada por la compañía francesa Cycleo, posteriormente adquirida por Semtech (fundadora de la *LoRa Alliance*), en el año 2015 y está basada en modulación CSS (*Chirp Spread Spectrum*), usando todo el ancho de banda del canal para incrementar (*up-chirp*) o reducir (*down-chirp*) su frecuencia con respecto al tiempo para transmitir los datos. En el caso de Europa, por la legislación vigente, LoRa usa el rango de frecuencias libres comprendidas entre los 863MHz y los 870MHz para transmitir o recibir cada símbolo codificado a través de estos incrementos o disminuciones de la frecuencia enmarcados en seis *Spreading Factors (SF)*, desde el 7 al 12. Estos *SF* son el número de bits empleados para caracterizar un símbolo, pues a cada uno de ellos le corresponde el valor de una frecuencia inicial, también conocidas como *chips* (no confundir con *chirps*, que son las subidas/bajadas de la frecuencia). El número de posibles *chips* para un *SF* viene dado por  $2^{SF}$ , distribuyéndose todas ellas de forma equidistante por el ancho de banda del canal. Cuanto mayor sea este factor, menor será la tasa de transmisión de símbolos, pero

su alcance se hará mayor; por el contrario, cuanto menor sea el factor, mayor se hará la tasa de transmisión y menor se hará el alcance. Por tanto, para enviar la misma información, los  $SF$  más altos requieren un mayor tiempo para la transmisión de los datos, lo que supone un mayor consumo de energía, pero se hará más robusta frente a interferencias y tendrá por tanto un mayor alcance.

$$T_s = \frac{2^{SF}}{Bw} \quad (s) \quad (2.21)$$

En la siguiente imagen (Figura 2.21) se puede apreciar la transmisión de estos *chirps*. Los 8 primeros son *up-chirp* para la transmisión de una notificación al equipo receptor del comienzo de un mensaje y los dos posteriores a éstos son *down-chirps* para marcar la sincronización del mensaje. A partir de ello, los *chirps* siguientes representan la información útil, en los cuales se toma una frecuencia inicial marcada como el valor del símbolo (*chip*) y se continúa incrementando la frecuencia hasta el final del periodo de símbolo,  $T_s$  (Ecuación 2.21), para saltar a la frecuencia inicial del siguiente símbolo. En el caso de alcanzarse la frecuencia límite máxima del ancho de banda se realiza un salto a la mínima, el *chip* 0, para así continuar incrementándose hasta dicho final. La cantidad de información útil depende del número de nodos conectados a la red, cuanto mayor sea el número de conexiones menor será ésta.

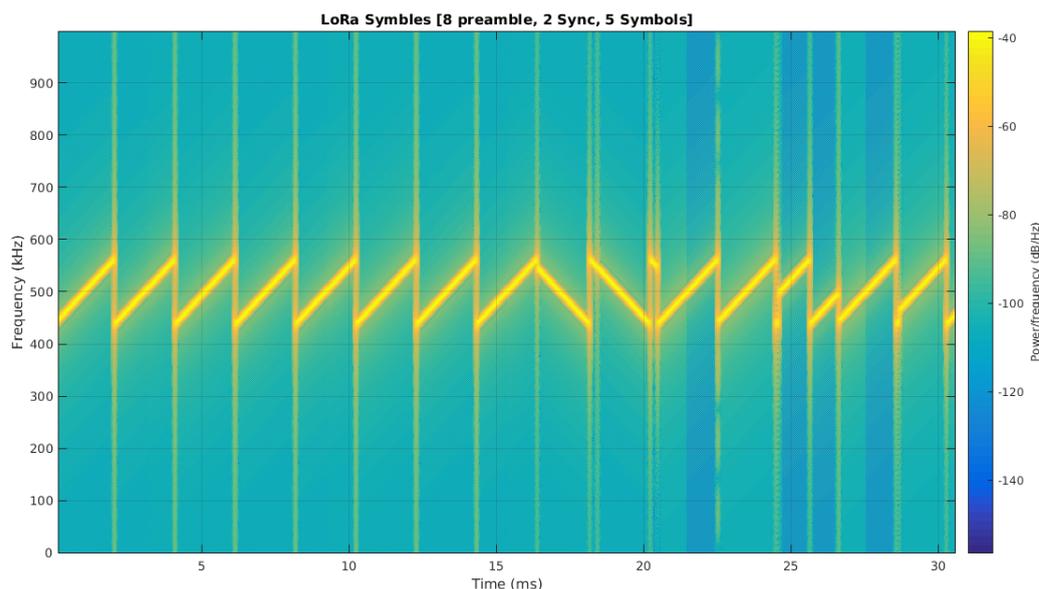


Figura 2.21: Transmisión de símbolos en la modulación CSS de LoRa

De esta forma, el datagrama utilizado por LoRa (Figura 2.22) puede definirse con un «preámbulo», en el que aparecen esos 10 *chirps* para la conexión y sincronización con el equipo receptor; una cabecera en la que se introducen los parámetros de la modulación y de la información transmitida (solamente si se hace de forma explícita, dando por hecho que el receptor no la conoce); la información útil transmitida que variará entre los 51 y los 222 Bytes en función del mensaje y del número de nodos en la red; y el código de corrección de errores de la información útil. Con este datagrama el nodo emisor no es capaz de conocer si la información ha sido recibida por el *gateway*, como una comunicación *best-effort*.



Figura 2.22: Datagrama de la capa física de LoRa

LoRa emplea en Europa 10 canales de 125KHz/250kHz para enlaces ascendentes y de 125kHz para descendentes. Dado que la tasa de transmisión está entre los 0.25kbps ( $SF=12$ , 125kHz) y los 25kbps ( $SF=7$ , 250kHz) por canal, la velocidad de datos estará entre los 250bps y los 11kbps. Esta tasa de bits se puede medir con la Ecuación 2.22.

$$R_b = SF \frac{Bw}{2^{SF}} CR \quad (bps) \quad (2.22)$$

donde  $CR$  es el *Coding Rate*, que se trata del número de bits no redundantes con respecto al total. De esta forma, su valor se refiere de forma relativa únicamente a la información real transmitida. Con LoRa normalmente se establecen entre 1 y 4 bits de corrección de errores por cada 4 bits de información. Un menor  $CR$  permite un mayor alcance pero también origina un mayor consumo de energía.

Adicionalmente, los  $SF$  son ortogonales, lo que quiere decir que frecuencias próximas entre ellas no causarán interferencias la una sobre la otra y se podrá aprovechar mejor el espectro para enviar múltiples señales con diferente  $SF$  a través de los canales. Por tanto, para determinar el número de nodos en la red que se conectan a cada *gateway*, se pueden adaptar tanto el ancho de banda utilizado y el número de canales empleados como el  $SF$ .

Por último, algo a tener muy en cuenta con respecto a la legislación de LoRa en Europa es lo que se denomina como periodo de actividad o *duty cycle*. Éste ha de ser menor o igual al 1% del tiempo. Esto quiere decir que por cada hora que el nodo esté en funcionamiento solamente podrá transmitir durante 36 segundos, lo cual no es del todo un inconveniente si se pretende transmitir una cadena de valores de la humedad del suelo a diferentes profundidades junto con la temperatura del entorno cada cierto tiempo a la vez que se economiza el consumo. Además, la potencia de transmisión está limitada a +14dB, pero la sensibilidad de las antenas suelen estar en torno a -150dB, lo que permite un gran *link budget*, es decir, un mayor alcance frente a posibles distorsiones del medio.

Entre los controladores LoRa más extendidos en el mercado actual europeo están los SX1276/77/79 de Semtech y los RFM95W de HopeRF.

Una vez comprendido el funcionamiento general de LoRa en la transmisión modulada de la información de forma inalámbrica a través de un canal aéreo, es razonable interesarse también por conocer cuáles son los fundamentos que proporcionan la conexión de los diferentes nodos a Internet, tal y como se buscaba a partir de la definición de tecnología *IoT*. Puesto que LoRa solamente es capaz de enviar o recibir los datos a través del transceptor, se requiere por tanto de una red que dé lugar a esta conectividad: ésta es LoRaWAN.

### 2.4.5. Entorno LoRaWAN

LoRaWAN[26] define el protocolo de comunicación y la arquitectura de la red basada en la capa inferior física de LoRa, tal y como queda reflejado en la Figura 2.23. Por tanto, su principal objetivo es el de administrar la capacidad de la red en cuanto al número de nodos en ésta, la calidad del servicio (QoS) a través de los diferentes canales para optimizar

la transmisión a una mayor tasa de datos con el mayor alcance posible, la seguridad de las comunicaciones y la variedad de las aplicaciones que ofrece la red. Además, gestionará el uso de la batería en función de las características de la red administrada.

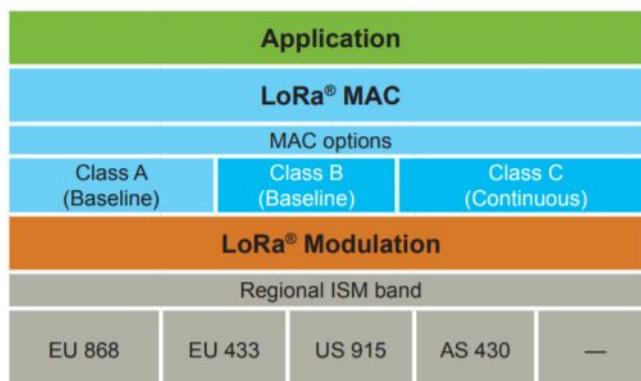


Figura 2.23: Modelo de capas de LoRaWAN

LoRaWAN funciona con una arquitectura de red en estrella en la que todos los nodos se conectan a los *gateways*, sin llevar a cabo comunicaciones directas entre los propios nodos finales. Esto permite que se ahorre energía en las recepciones y transmisiones de los nodos finales y se reduzca la complejidad de la red ya que ninguno de ellos actuará como nodo intermedio de retransmisión además de su propia función como nodo final, como ocurre en el caso de Zigbee. Sin embargo, esto impide extender todavía más el alcance, aunque LoRa ya de por sí permite la comunicación entre dispositivos a distancias más largas que otras tecnologías y sin añadir la latencia ni la limitación de capacidad que se produce en la comunicación entre nodos, consumiendo la energía de una forma más eficiente.

Además, estos nodos finales no se asocian directamente con uno de los *gateways*, sino que la información transmitida por éstos es recibida por todos aquellos *gateways* a los que la señal alcance, lo que permite una mayor movilidad de los dispositivos sin necesidad de realizar *handover*. Dicha información se replicará así tantas veces como *gateways* en la red hayan recibido el mensaje, por lo que el encargado de filtrar la información redundante será el servidor de la red. Éste se encargará además de realizar las debidas comprobaciones de seguridad de la red, controlar el flujo de datos en las comunicaciones, etc. También realizará una transmisión *downlink* a través del *gateway* correspondiente hacia los nodos finales para confirmarles la recepción de sus mensajes, lo que hace que la red se asemeje ahora más a un esquema TCP.

Como se puede ver en el esquema de la Figura 2.24, la red LoRaWAN se compone por tanto de cuatro elementos principales:

- **Nodos finales:** Se trata de los dispositivos con capacidad de recolección de datos a través de sensores. Se encargan de transmitir dichos datos y recibir instrucciones por parte del servidor de la aplicación en concreto que trabaja con este tipo de datos y dispositivos.
- **Gateways:** Actúan de forma transparente en este intercambio de información de las diferentes aplicaciones, concentrándola y volviéndola a transmitir de forma ascendente o descendente, esta vez empleando la tecnología correspondiente a la red en la que se encuentre el servidor de red (TCP/IP) o a través de LoRa, respectivamente.

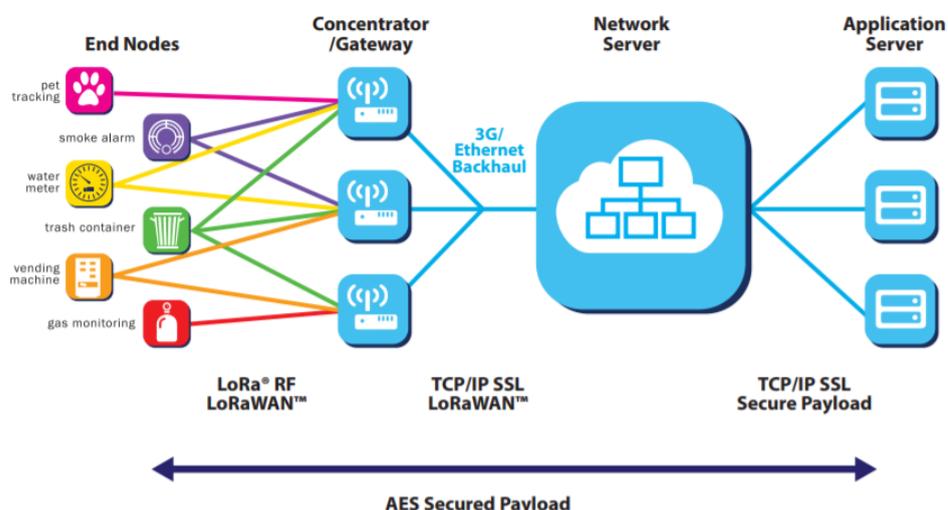


Figura 2.24: Topología de la red LoRaWAN

- Servidor de red:** Su función principal es el control y la gestión de la red LoRaWAN. Se conecta a los diferentes *gateways*, ya sea de forma alámbrica o inalámbrica, a través de una comunicación TCP/IP segura. En él se eliminan los mensajes duplicados provenientes del mismo nodo, se definen *default gateways* para la comunicación con los nodos finales y se establecen las limitaciones en las capacidades de transmisión en los canales para cada uno de ellos de forma flexible (*Adaptive Data Rate, ADR*) para minimizar el consumo de energía de la red. Se encarga también de retransmitir la información filtrada proveniente de los nodos finales hacia los servidores de cada aplicación.
- Servidor de aplicación:** Recoge la información transmitida por los nodos finales y la decodifica. A él se conectan otros terminales a través de la red TCP/IP para acceder a los datos para así analizarlos y determinar las acciones a realizar como respuesta a los valores de los parámetros.

Estos servidores pueden encontrarse en diferentes puntos del planeta gracias al uso más extendido de tecnologías inalámbricas basadas en TCP/IP para conectarse con los *gateways* a través de Internet. Sin embargo, para reducir la latencia entre extremos lo máximo posible se suelen conectar *gateways* y servidor de red de forma directa, sin llegar a pasar por la red del operador de Internet (e.g. 3G, punto de acceso WiFi o Ethernet), como se ve en la Figura 2.25. En cambio, los servidores de aplicación sí que suelen conectarse a este servidor de red a través de Internet o *Cloud* dado que las aplicaciones suelen estar desarrolladas por terceros para ofrecer un servicio más flexible y avanzado, como es el caso de *ChirpStack*. Es por ello por lo que es muy importante establecer mecanismos de seguridad en las comunicaciones entre los nodos finales y los servidores de aplicación para garantizar la integridad, como puede ser el cifrado AES, ya que las comunicaciones quedan descubiertas a su paso por la red de un operador y se precisa del uso de claves que las cifren, las denominadas AppSKey. También se establece una segunda capa de seguridad dentro de la propia red LoRaWAN para garantizar la autenticidad de la información con las NwkSKey. Las respectivas claves de cifrado/descifrado pueden repartirse bien manualmente durante el despliegue de la red al completo, lo que se conoce como *Activation By*

*Personalization* o *ABP*; o de forma automatizada a través de las ID únicas que reciben cada uno de los dispositivos por parte del servidor de red (DevEUI) y para cada aplicación (AppEUI), denominado como *Over-The-Air Activation* o *OTAA*, lo que permite también que estas claves no estén predeterminadas y se puedan regenerar de una forma más segura y eficiente.

Es importante también que estos *gateways* cuenten con una gran capacidad de intercambio de información con un mayor volumen de nodos finales. Esto se logra con equipos transceptores multicanal con ADR para poder recibir y enviar múltiples mensajes a través de los diferentes canales. Cuantos más canales utilice mayor capacidad tendrá. Otros parámetros que influyen en el ADR son el *SF* anteriormente mencionado, el ancho de banda destinado a *uplink* y *downlink*, el *coding rate*, el tamaño de la información útil transmitida que puede procesar el *gateway* y ese *duty cycle* inferior al 1%. Como ya se ha comentado recientemente, gracias a la ortogonalidad entre los diferentes *SF*, el *gateway* puede recibir a través de un mismo canal las comunicaciones de varios nodos finales con *SF* diferentes. A menor *SF*, mayor será el número de nodos finales a los que se les podrá conceder un *slot* temporal para comunicaciones, aunque aquellos más alejados necesitarán un *SF* mayor y requerirán de más tiempo. Todo ello permite la escalabilidad de la red LoRaWAN con un consumo minimizado de energía.

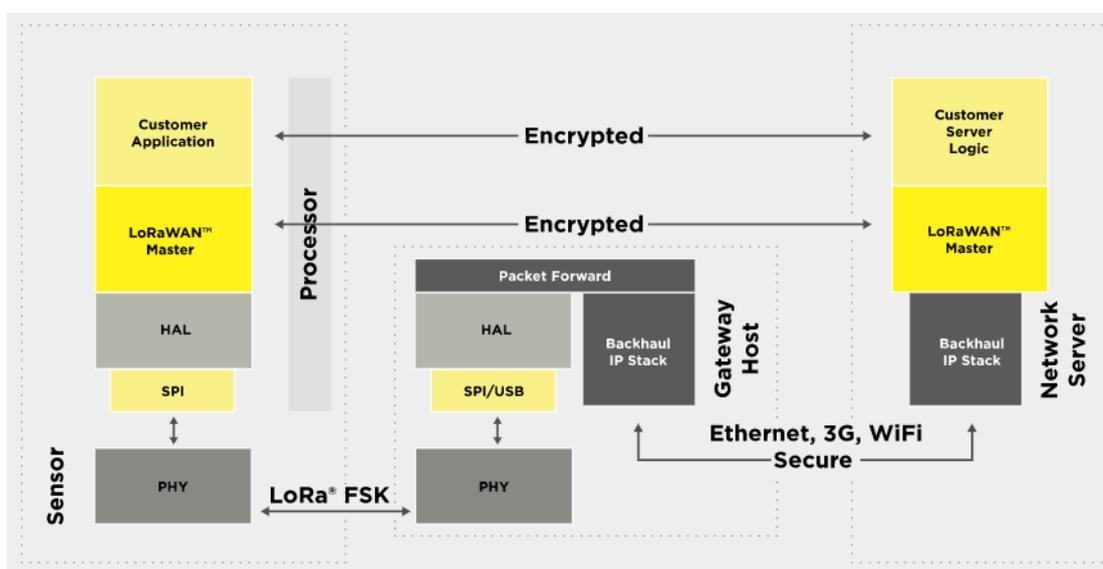


Figura 2.25: Esquema de transmisión de datos de la red LoRaWAN

Para transmitir los datos desde un nodo final, en función de las necesidades del mismo y de la aplicación, se pueden establecer diferentes clases para cada uno de ellos. Estas clases son tres y se tratan de las siguientes:

- Clase A:** Los dispositivos de esta clase son los que menos consumen por su sistema de comunicación asíncrono que se establece mediante el protocolo *Aloha*, enviando la información de forma programada o cuando disponga de ella. Se realiza por tanto una comunicación *uplink* a la que le siguen dos ventanas pequeñas de tiempo de escucha de transmisiones *downlink* desde el servidor de red. Aquellos mensajes que se envíen después desde los servidores de aplicación tendrán que esperar a la siguiente ventana después de que se produzca otra transmisión *uplink*, siendo almacenados mientras tanto en el servidor de red.

- **Clase B:** Realizan la misma función que la Clase A, solo que se programan ventanas adicionales de tiempo para la recepción de instrucciones provenientes del servidor tras recibir una señal *beacon* proveniente del *gateway* para establecer la comunicación, lo que lo convierte en un sistema síncrono. Esto consume más energía, pero permite una mejor comunicación entre extremos finales dado el intercambio más frecuente de información.
- **Clase C:** También realizan la misma función que la Clase A, solo que en este caso cuentan con ventanas de tiempo prácticamente continuas por estar solapadas entre sí para la recepción de las comunicaciones *downlink*. Solamente se cierran para permitir la transmisión *uplink*. Esta clase es la que más energía consume, pero permite ejecutar acciones en tiempo real en situaciones más críticas en las que se requiere un menor tiempo de respuesta.

Por último, cabe a mencionar que existen comunidades LoRaWAN de libre acceso a recursos como *The Things Network (TTN)*, la cual provee de toda la infraestructura necesaria como *gateways* y servidores de red y de aplicación de otros usuarios para que cualquier persona pueda ampliar la red con nuevos nodos y emplearla para recoger los datos de sus propios nodos finales aunque, además de la normativa europea, tiene sus propias restricciones para su uso compartido responsable por parte de todo el colectivo. Dado que el uso que se le pretende dar a la red es el de menor coste posible para una alta capacidad, se debe estudiar si se podría usar este sistema o si de lo contrario conviene optar por implementar uno propio con elementos muy básicos y asequibles ya que esto depende principalmente de la comunidad existente en una determinada localización geográfica, pues en el caso de la provincia de Granada actualmente solo existen dos *gateways*, uno en el centro de la capital y otro en Churriana de la Vega, un municipio del área metropolitana, ambos con alcance sobre un pequeño área de la vega de Granada, donde se concentra la mayor parte de la actividad agrícola de la zona. Esta dependencia de la escasa infraestructura limita mucho la viabilidad del proyecto en la vega granadina. Además, el uso compartido de la infraestructura con una alta demanda puede limitar también la capacidad, por lo que no sería posible utilizar un gran volumen de nodos. Por tanto, se tratará de dar una solución más orientada a los entornos privados donde se requiera de flexibilidad, para todos los posibles casos en los que se requiera de mayor o menor capacidad; escalabilidad, por si fuera necesario ampliar la red; disponibilidad, con una redundancia para absorber posibles fallas de la red y permanecer con la lectura continua de la humedad del suelo y la temperatura del entorno; seguridad para evitar que se pueda interferir en las comunicaciones; y alcance, para que la extensión del terreno no sea un factor del todo determinante. Se podría disponer también de software que actúe en la gestión de la red y los datos con los que trabaja, como puede ser la solución *open-source* de *ChirpStack*.

## Capítulo 3

# Herramientas hardware y software

Una vez se ha estudiado en profundidad los diferentes elementos que forman este proyecto, se procede ahora a nombrar y comentar brevemente todas las herramientas hardware y software que se emplearán para el desarrollo del mismo.

### 3.1. Hardware

Entre los diferentes elementos hardware del proyecto se pueden encontrar el circuito integrado 555, el módulo ESP32 LoRa de TTGO en su versión europea (868MHz) y la Raspberry Pi 3B+.

#### 3.1.1. Circuito integrado 555

El circuito integrado 555[27][28] es capaz de transformar una señal DC más o menos pura, como puede ser la de una pila o una batería, en otra de pulsos cuadrados del mismo signo a una frecuencia y amplitud determinadas por un temporizador interno. Este temporizador es regulable, es decir, según la aplicación puede modificarse su frecuencia y el *duty cycle* a través de componentes pasivos externos a éste como resistencias y condensadores. Con ello, se pueden implementar circuitos más complejos en los que se requiera de dicha señal de control. De hecho, el circuito integrado 555 es el oscilador más extendido en electrónica. Su nombre viene dado por las tres resistencias de  $5k\Omega$  empleadas como divisores de tensión. El circuito interno en cuestión es el de la Figura 3.1.

Como bien se puede apreciar, dichos divisores de tensión se conectan entre la masa (*GND*) y el polo positivo de la fuente de alimentación DC (*+Vcc Supply*) del circuito, así segmentando el valor de tensión en dos umbrales: en uno y dos tercios del voltaje original. De ellos se parte hacia dos comparadores basados en el disparador de Schmitt, los cuales se tratan de dos amplificadores operacionales, uno en configuración inversora y el otro en no inversora, respectivamente, empleando su ganancia diferencial para detectar si un voltaje de entrada es superior o inferior a uno de referencia. Por tanto, si el valor de entrada, que es el valor de tensión entre los extremos de una capacidad externa, es mayor que el de referencia, que en este caso es el del divisor de tensión, el valor de la salida saturada en el caso del no inversor será positiva,  $V_{OH}$  (valor digital 1), mientras que para el caso del inversor es negativa,  $V_{OL}$  (valor digital 0). Con ello es con lo que se controla esa tensión en la capacidad (*Threshold-Trigger* y *GND*) para que se sitúe entre los límites marcados por

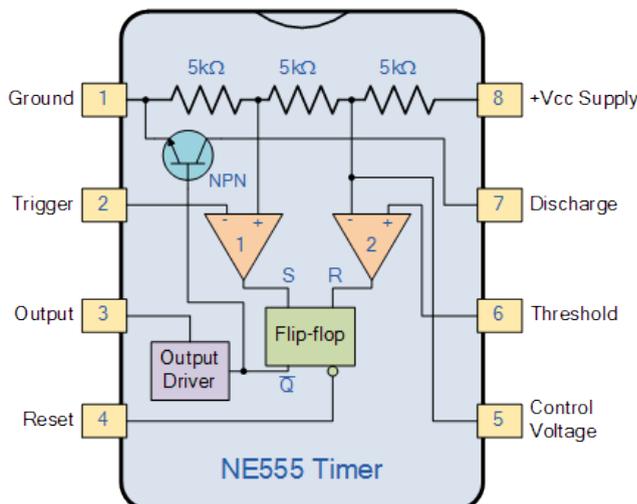


Figura 3.1: Esquema interno de un temporizador 555

los divisores de tensión. A las salidas de estos últimos se conecta un biestable con memoria (*flip-flop RS*) que dará como resultado una salida (*Output*) de máxima amplitud después de que el condensador comience a cargarse por debajo del primer umbral de  $V_{cc}/3$  y fije la entrada S (salida del inversor) a 1. Aunque el condensador sobrepase ese primer umbral de  $V_{cc}/3$  y la salida del comparador inversor pase a ser 0, el biestable entrará en modo memoria y su salida seguirá siendo la de máxima amplitud siempre y cuando el valor de R (salida del no inversor) sea 0, es decir, que no llegue al segundo umbral de  $2V_{cc}/3$ . En el caso de que la tensión supere ese segundo umbral el valor R será 1 y, por tanto, el valor de salida del biestable pasará a ser nulo, así descargándose el condensador (*discharge*) por debajo de ese segundo umbral hasta llegar al primero a través de ese transistor NPN y restaurándose el valor del comparador inversor instantáneamente a 1 y luego a 0. De esta forma, dado que la salida del biestable está reinvertida antes de la salida, pues el *Output Driver* es básicamente una puerta NOT, cada periodo de carga del condensador marcará la existencia de un pulso cuadrado a la salida del sistema mientras que el transistor no estará activado y por tanto no descargará al condensador. Ocurrirá lo contrario cuando la salida del biestable sea 0. También se podrá restaurar manualmente conectando el biestable a masa a través del pin *Reset*.

La velocidad con la que el condensador se carga y descarga depende exclusivamente del valor de la propia capacidad, cuanto menor sea ésta mayor frecuencia se logrará; y del valor de las resistencias externas a través de las cuales fluye la corriente con la que se carga el condensador, también cuanto menor sean los valores, más rápido se cargará y por tanto mayor será la frecuencia. Cada modelo basado en el 555 así como cada fabricante admite unos rangos de frecuencias y de tensiones alimentación determinados. Entre los circuitos integrados 555 más conocidos están el NE555P (hasta 100kHz), el 7555 (hasta 500kHz), el TLC555 (hasta 2.1MHz) o el LMC555 (hasta 3MHz). Por tanto, la elección entre uno u otro dependerá sobretodo de la frecuencia de resonancia de las bobinas que se pretendan implementar, escogiendo así aquel modelo que permita un correcto funcionamiento a dicha frecuencia, pues el resto de parámetros, como la tensión de alimentación o las corrientes de salida, son muy semejantes.

Existen tres modos de trabajo de este circuito integrado 555:

- Astable:** El temporizador funciona de forma independiente y automatizada, así nunca estabilizándose a ningún valor de tensión. Ninguna señal externa interviene para el control de los pulsos. La relación entre los valores de las resistencias externas pueden establecer un *duty cycle* entre el 50 % el 100 % del periodo establecido por el condensador. Con ello se puede establecer un oscilador que opere a una frecuencia y un *duty cycle* determinados en función de la aplicación.
- Monoestable:** El temporizador funciona como un disparador con una única variable. Cada vez que se produzca un disparo de valor nulo a través del *Trigger* (pin 2) la salida del circuito integrado pasará a tener máxima amplitud hasta que el condensador se cargue hasta el segundo umbral de  $2V_{cc}/3$ . Ajustando los tiempos de disparo se pueden lograr aplicaciones PWM, en las que el ancho del pulso depende del estado de descarga del condensador, es decir, cuanto más consecutivos sean los disparos, menor será el pulso, pero si se pasa a un mayor distanciamiento entre disparos, mayor será el ancho del pulso.
- Biestable:** El temporizador funciona como un disparador con dos variables. Cada vez que se produzca un disparo de valor nulo a través del *Trigger* (pin 2) la salida del circuito integrado pasará a tener máxima amplitud hasta que se produzca otro disparo de valor nulo a través del *Threshold* (pin 6). En este caso el pin 7 de descarga queda inutilizado. Con ello se puede lograr un control total sobre la duración de los pulsos para establecer dos posibles estados estables.

En este proyecto se empleará un único modo para automatizar la generación de pulsos que den lugar a una señal AC mediante su inversión mediante transistores BJT y su posterior filtrado. De esta forma se utilizará el modo Astable (Figura 3.2), el cual se encuentra reflejado en el *datasheet*[28] de cualquier circuito integrado basado en el 555.

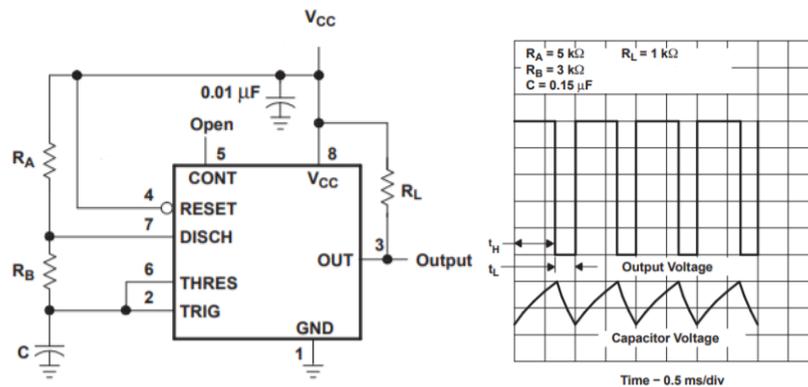


Figura 3.2: Modo de operación Astable del 555

De este modo, se puede calcular de forma lineal la frecuencia (Ecuación 3.1) y el *duty cycle* (Ecuación 3.2) de la señal de salida a través de sus componentes siempre y cuando sus valores estén dentro del margen de operación garantizado por el fabricante.

$$f \approx \frac{1.44}{(R_A + 2R_B)C} \quad (Hz) \quad (3.1)$$

$$D = \frac{R_A + R_B}{R_A + 2R_B} \cdot 100 \quad (\%) \quad (3.2)$$

### 3.1.2. TTGO ESP32 LoRa 868MHz

Para la conectividad inalámbrica LoRa de los nodos finales se ha valorado el mercado actual de dispositivos basados en esta tecnología. Debido a la intención de lograr un bajo coste de implementación del sistema, las posibilidades se han limitado drásticamente a un reducido grupo de modelos y fabricantes. Además, para mayor sencillez, la búsqueda se ha centrado en el uso de módulos SBC (*Single Board Computer*) completos con *chips* LoRa integrados en lugar de únicamente estos últimos. Finalmente, debido a que su coste es inferior a cualquier otro dispositivo y sus características son más que suficientes para lograr el propósito de este proyecto, se ha decidido utilizar el modelo ESP32 LoRa v1 de TTGO (Figura 3.3). En concreto, este módulo es muy similar a su homónimo del fabricante Heltec, el cual se trata de un modelo muy extendido por su aparición en un gran número de proyectos *IoT*; pero su antena está mejor adaptada a la frecuencia europea.

Este modelo en cuestión cuenta además con una pantalla OLED de 0.96 pulgadas, lo cual facilitará en gran medida la experimentación con la red y su posterior incorporación al sistema final gracias a una lectura más rápida de los datos transmitidos y el estado de la conexión. También permitirá en el futuro realizar un diagnóstico más rápido en un posible caso de se produzcan fallos en el sistema como puede ser la desconexión de los sensores, tiempo de desconexión prolongado con su *gateway*, batería baja, etc.



Figura 3.3: TTGO ESP32 LoRa v1 con antena de 868MHz

Esta comunicación LoRa se realiza mediante el módem SX1276[29] del fabricante Semtech, el cual, aunque es el más genérico y no está completamente adaptado a la regulación europea del espectro de radiofrecuencia, se puede limitar su uso al rango de los 868MHz. Este módem es uno de los más extendidos en el mercado debido a su bajo coste y su buen rendimiento en este tipo de aplicaciones, pues ofrece una potencia de transmisión de 20dB y una sensibilidad en la recepción de incluso -148dB, lo que permite considerar un *link budget* de hasta 168dB en pérdidas. Esto se consigue siempre y cuando esté acoplado con la antena adaptada a través de la interfaz IPEX, pues de lo contrario se podría llegar a dañar por la reflexión de la señal de transmisión. Este sistema requiere ser alimentado con un voltaje de 3.3V, lo que lo hace ideal para su integración en el módulo ESP32, cuyo rango está entre esos 3.3V y los 6V a través de su interfaz serial CP2102 micro-USB o la SH1.25mm para baterías de litio.



Por tanto, se pueden llegar a utilizar diferentes entradas ADC para la lectura de los sensores basados en bobinas a diferentes profundidades y transmitirlos así a un nodo central mediante la red LoRaWAN que, con el rendimiento de los módulos y la ganancia de las antenas, se puede lograr alcanzar transmisiones a media distancia en campo abierto de aproximadamente unos 10-15km.

### 3.1.3. Gateway basado en LoRaWAN para la recepción de datos

Durante el estudio de la tecnología LoRa se mencionaron las características y la función que desempeña cada uno de los elementos involucrados en la red LoRaWAN que conforma el sistema ideado, desde los servidores hasta cada uno de los nodos según su aplicación y capacidades, compartiendo entre ellos la información mediante dicha tecnología inalámbrica a través de los denominados *gateways*. Normalmente, estos *gateways* son multicanal, lo que permite contar con un mayor número de nodos finales LoRa por cada uno de ellos.

En este proyecto se considera la posibilidad de emplear algunos de estos *gateways* multicanal comerciales en función del despliegue de red que se pretenda realizar, así teniendo en cuenta el número de nodos finales a los que se pretenda dar conectividad, la carga que aporta cada nodo por cada transmisión, la frecuencia y la duración con las que cada uno de ellos se comunica con los servidores, etc. Se tratará por tanto de una tarea más orientada al dimensionado de la red, pues existe una gran variedad de marcas y modelos. Entre estas marcas están Heltec, RAK, Seeed, Dragino o los propios de TTN. Cada una de ellas ofrece diferentes modelos para los diferentes rangos de frecuencias legislados en cada región del planeta, con un determinado número de canales y con diferentes *chips* que permitirán mayor o menor velocidad de transmisión, *delay*, etc. Este mayor rendimiento se traduce también a un mayor coste por unidad.

Sin embargo, debido al elevado coste que supone cualquiera de estos modelos para este proyecto para concluir el grado por el que se presenta y su escaso aprovechamiento para tan solo una demostración de un único dispositivo final, se empleará un *gateway* monocanal implementado sobre otro dispositivo ESP32 LoRa. Se aprovechará por tanto la conectividad WiFi característica de los ESP32 para transmitir los datos recolectados hacia los servidores, alojados en una máquina Raspberry Pi 3B+.

### 3.1.4. Raspberry Pi 3B+ con Raspbian

Raspberry Pi se ha consolidado como la principal solución para quienes busquen una SBC o *Single Board Computer* para la computación de bajo coste y con bajo consumo de energía. En concreto, el modelo Raspberry Pi 3B+[31] mostrado en la Figura 3.5 se ha convertido en el último año en una de las placas más comercializadas para la implementación de sistemas embebidos como puede ser *IoT*, del que se trata en este proyecto. Esto se debe principalmente a su razonable rendimiento para un precio realmente asequible, utilizando un procesador Broadcom BCM2836 ARM Cortex-A53 x64 a 1.4GHz con 1GB de memoria RAM y hasta 2TB de memoria microSD para el almacenamiento de datos. También es posible ampliar la memoria a través de discos duros externos conectados a uno de los cuatro puertos USB 2.0.

Además, su bajo consumo de 12.5W y sus reducidas dimensiones lo hacen una opción aún más atractiva. Posee además conectividad WiFi IEEE 802.11b/g/n/ac dual band (2.4GHz y 5GHz) y Bluetooth Low Energy 4.2. Se puede conectar también directamente a

la red de datos a través de su interfaz Gigabit Ethernet de 300 Mbps con PoE (*Power over Ethernet*), por lo que la propia conexión a la red puede proporcionarle la alimentación necesaria.



Figura 3.5: SBC Raspberry Pi 3B+

A través de sus 40 pines (Figura 3.6) pueden conectarse múltiples módulos externos o periféricos tales como sensores, pantallas, *webcams*, etc. Es importante conocer que no todos ellos son de propósito general (GPIO), pues algunas están también reservadas para determinadas funciones como pueden ser alimentación (3.3V, 5V o GND), CLK, SPI, UART o I2C.

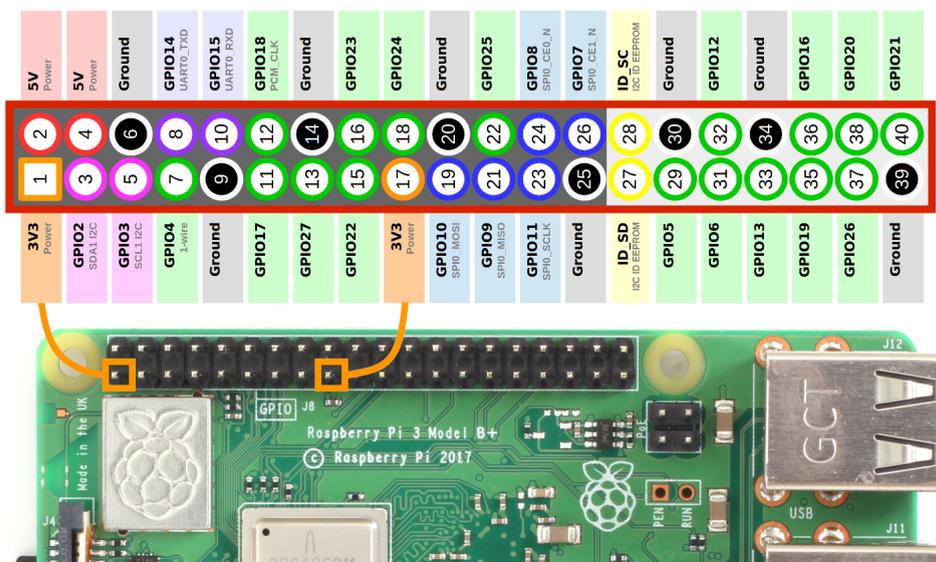


Figura 3.6: Mapeado de pines de la Raspberry Pi 3B+

Como se puede apreciar, tanto el ESP32 como la Raspberry Pi son placas con ciertas semejanzas entre ellas por su gran capacidad de conectividad, su bajo consumo o su mapeado de pines para interactuar con otros dispositivos; sin embargo, a diferencia del módulo de ESP32 que ejecuta instrucciones previamente programadas y compiladas en la memoria FLASH, la Raspberry Pi destaca por su capacidad software de albergar un

sistema operativo almacenado en una tarjeta microSD que actúa en parte como memoria EPROM. Dada la gran comunidad de desarrolladores que existe detrás de estas placas, se pueden encontrar multitud de sistemas operativos ligeros de 64-bits y de código abierto basados en esta infraestructura hardware, lo que permite su fácil acceso e instalación. La mayor parte de ellos están basados en Linux, aunque también se pueden encontrar una multitud de sistemas operativos completos o ligeros, en donde se enmarcan las distribuciones de Android o Linux; basados en multimedia, como pueden ser Kodi o LibreELEC; de emulación, como RetroPie o Lakka; o incluso uno basado en Microsoft Windows 10 para IoT. Sin embargo, para la implementación de los servidores de la red LoRaWAN se utilizará una versión más completa y versátil de sistema operativo completo como es Raspbian (Figura 3.7), la distribución Linux-Debian oficial optimizada para esta placa.

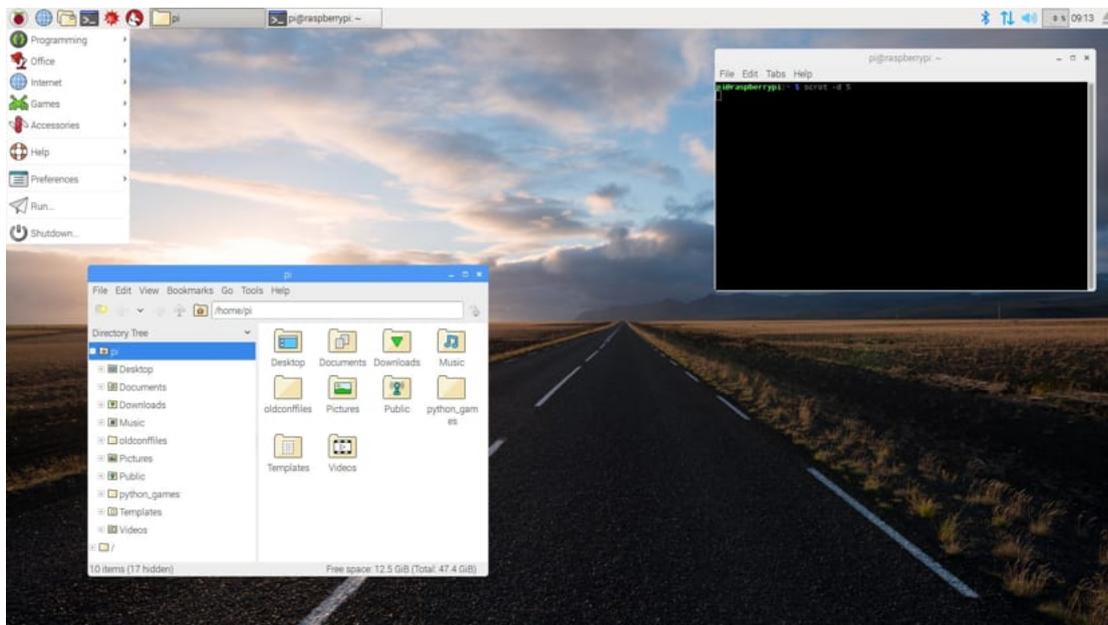


Figura 3.7: Captura de la GUI de Raspbian OS

## 3.2. Software

Entre los diferentes elementos software del proyecto se pueden encontrar el simulador de circuitos electrónicos de OrCAD, la interfaz de programación de sistemas Arduino IDE y ChirpStack.

### 3.2.1. Simulador de circuitos electrónicos de OrCAD

OrCAD[32] es la solución software para la Automatización de Diseño Electrónico (EDA). Esta herramienta es muy utilizada por ingenieros tanto individualmente como en entornos empresariales para la simulación de esquemas electrónicos analógicos o digitales y el diseño de placas de circuitos impresos (PCB).

El programa cuenta con numerosos dispositivos electrónicos parametrizados y virtualizados para actuar en un circuito de forma muy similar a lo que haría en la realidad a través de su comportamiento regido por las leyes electromagnéticas. En concreto, las secciones

utilizadas en este proyecto del conjunto global de OrCAD son *Capture CIS Lite* (Figura 3.8) para la esquematización del circuito a través de los componentes, sus características y el conexionado entre ellas; y *PSpice AD Lite* para la representación gráfica de su comportamiento en el dominio del tiempo o de la frecuencia. Por tanto, su uso se limitará a la simulación previa a la implementación del circuito de alimentación de las bobinas para tratar de lograr un esquema que permita generar una señal sinusoidal a la frecuencia deseada a partir del circuito integrado 555 anterior.

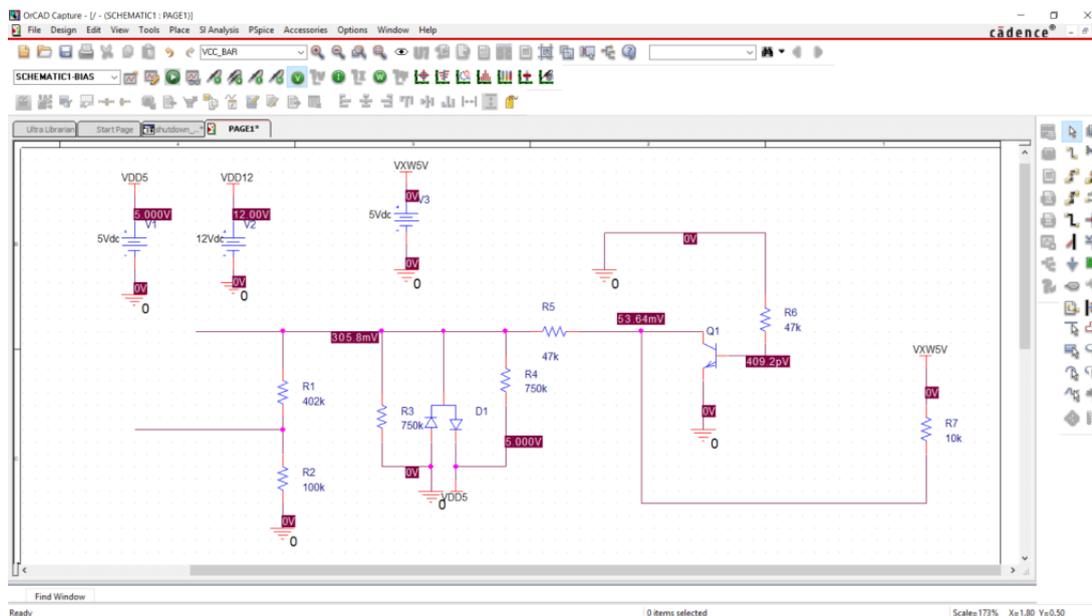


Figura 3.8: Captura de la GUI de OrCAD

### 3.2.2. Interfaz de programación de sistemas Arduino IDE

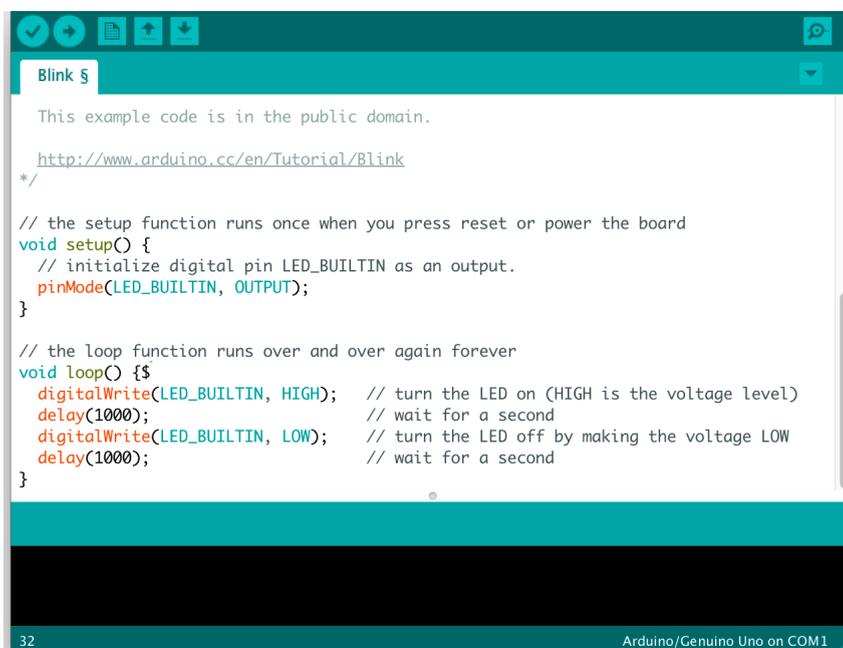
Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) es una aplicación multiplataforma para la programación y posterior compilación de código basado en los lenguajes de programación C/C++ y Java sobre dispositivos con memoria FLASH/EPROM compatibles con las placas propiedad de la misma marca a través de interfaces como UART o RS232. Este lenguaje característico de Arduino IDE se llama *Processing*. Trabaja a su vez con una serie de librerías que establecen metodologías de entrada y de salida de los pines controlados por el microcontrolador o microprocesador de la placa. Estas librerías están diseñadas para cada una de las diferentes placas de Arduino, a las que se añaden todas aquellas compatibles y desarrolladas por los propios fabricantes independientes a esta compañía, para las que existen otra serie de librerías exclusivas a éstas. Además, existen otras librerías destinadas a la compatibilidad de módulos adicionales, como pueden ser sensores, cámaras, *chips* de conectividad, *shields*, etc; para los que se requiere de un rendimiento optimizado para una determinada placa.

La programación de este sistema se basa tan solo en dos funciones primordiales que no pueden ser suprimidas y que en la compilación se ligan a una función principal: *setup* y *loop* (Figura 3.9). En la primera se establecen los parámetros y condiciones iniciales con las que arrancará en sistema una vez se inicie o reinicie, así configurando los pines utilizados, los valores de constantes y variables, el estado de las salidas, etc; mientras que

en la segunda se establece un esquema de ejecución cíclica que volverá a ejecutarse una vez termine, nunca saliendo de él, aunque sí se pueden establecer condiciones o bucles internos para su administración, tales como *while* o *for*. También cabe la posibilidad de realizar llamadas a funciones adicionales dentro del mismo entorno del proyecto desde éstas.

Además, dentro de las librerías de cada dispositivo se cuenta con numerosos ejemplos que permiten a un usuario menos experimentado conocer el uso potencial que se le puede dar a éste. Es habitual la implementación de código personalizado de un desarrollador sobre los ejemplos ya que se pueden guardar nuevos ficheros para poder cargarlos de una forma más sencilla sobre el dispositivo más adelante.

Cuando se ha completado el código a través de su editor de texto, pasa a compilarse. Una vez lo esté y se haya cargado sobre el dispositivo, es posible ver los resultados de la ejecución del código bien a través de alguna salida visual como puede ser alguna pantalla o algún método más rudimentario como el encendido o apagado de un LED; o bien a través del monitor que el sistema incorpora y sobre el cual el dispositivo puede transmitir el valor de los datos a través de la interfaz mediante la librería *Serial*.



```
Blink 5
This example code is in the public domain.
http://www.arduino.cc/en/Tutorial/Blink
*/
// the setup function runs once when you press reset or power the board
void setup() {
  // initialize digital pin LED_BUILTIN as an output.
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
}
// the loop function runs over and over again forever
void loop() {$
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
  delay(1000); // wait for a second
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW); // turn the LED off by making the voltage LOW
  delay(1000); // wait for a second
}
32 Arduino/Genuino Uno on COM1
```

Figura 3.9: Interfaz de programación de Arduino IDE

### 3.2.3. ChirpStack

Anteriormente conocido como LoraServer, ChirpStack[33] es la solución software libre basada en *Cloud* para la gestión de redes LoRaWAN así como de las aplicaciones con las que se trabaja a través de su interfaz web (Figura 3.11). A través de este sistema se pueden definir por tanto diferentes perfiles de usuario y de organización para su administración, configurar las comunicaciones con los dispositivos finales y los *gateways* para así hacerlas más seguras, implementar integraciones basadas en el protocolo HTTP o en bases de datos para tratar los datos de las aplicaciones y también se pueden ver las tramas en las comunicaciones entre los servidores de red y de aplicación con los dispositivos y los *gateways*, entre otras muchas cosas. Cuenta además con una API a través de la cual se

pueden realizar consultas sobre el estado de los dispositivos y *gateways*, las configuraciones de los mismos, la gestión de los perfiles organizativos, etc.

La mayor ventaja que posee ChirpStack en este proyecto con respecto a otros sistemas similares como es *The Things Network* es que se puede implementar una red de uso totalmente privado con el mismo nivel de seguridad y con la posibilidad de usar equipamiento destinado exclusivamente al tráfico generado por los nodos finales sobre los que se pretende trabajar. De esta forma, se pueden utilizar los recursos de los nodos de forma íntegra y así optimizar y flexibilizar un despliegue de red más comercial con el menor coste asociado posible para la recolección de datos de humedad en el suelo en diferentes puntos de un espacio agrícola. Para lograrlo, se define el siguiente esquema de red basado en el de LoRaWAN (Figura 3.10).

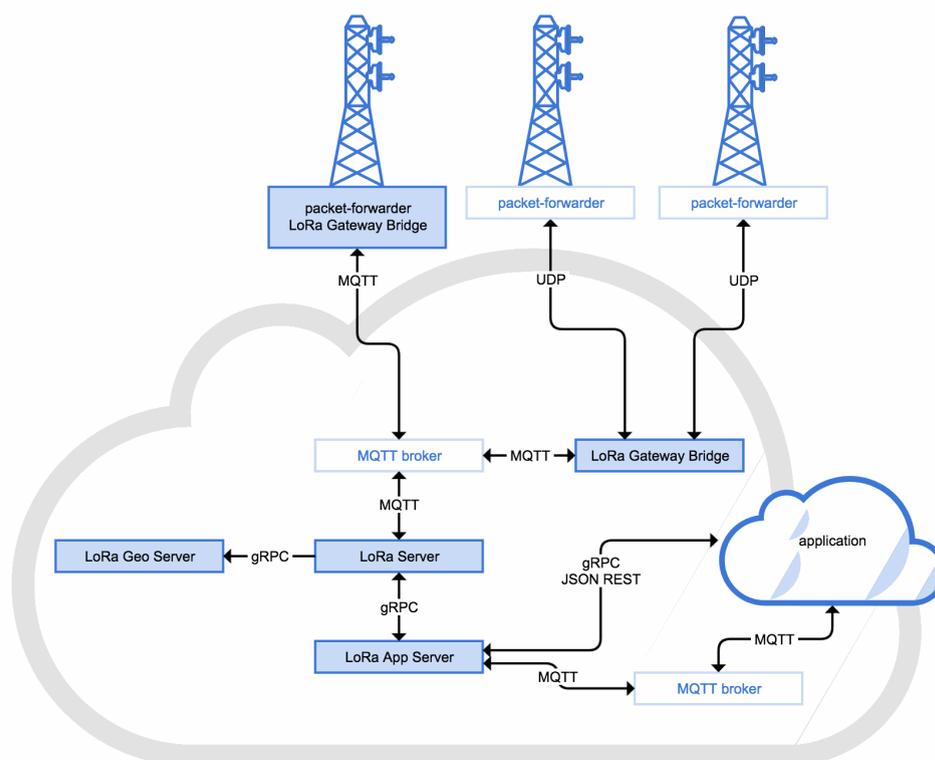


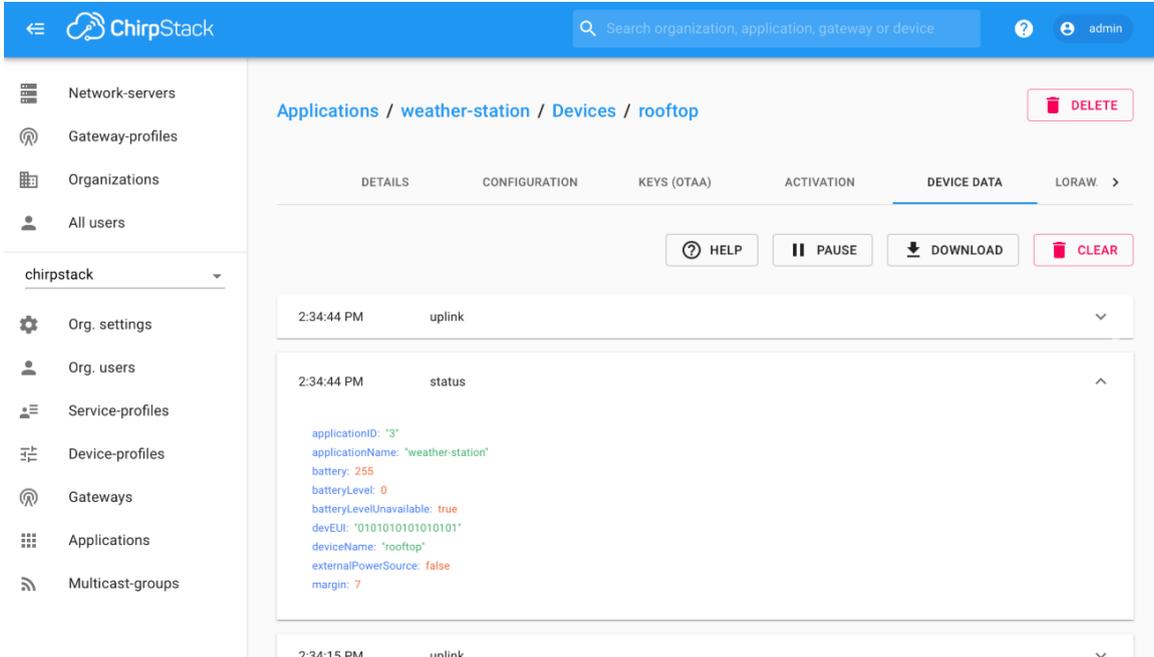
Figura 3.10: Arquitectura de la red LoRaWAN con ChirpStack

Como se puede apreciar, la red se compone de tres elementos principales:

- **Lora Gateway Bridge:** Es el encargado de establecer la comunicación con los *gateways* desplegados en la red. Transforma los paquetes UDP/IP recibidos en JSON y los envía a LoRa Server, el servidor de red, a través del protocolo MQTT por publicación-suscripción a un MQTT *broker* o mediador.
- **Lora Server:** Filtra y deduplica los mensajes cifrados recibidos para posteriormente transmitirlos a LoRa App Server, el servidor de aplicación. También programa las transmisiones *downlink* hacia los dispositivos finales a través del *gateway* correspondiente, como se ha mencionado anteriormente con la red LoRaWAN (apartado 2.4.5).

- **Lora App Server:** Maneja los datos recibidos para cuestiones de activación por ABP/OTAA, cifrado, formato de los datos, integraciones, acceso de múltiples aplicaciones a través de la API, etc.

En este proyecto se utilizará una configuración más elemental para la implementación de la red LoRaWAN aunque, como se puede ver, este sistema ofrece una infinidad de posibilidades que se pueden adaptar a la demanda. ChirpStack cuenta además con varias integraciones que permiten el tratamiento de los datos recibidos en el servidor de aplicación, como es el caso de InfluxDB. Esta integración permite que ChirpStack almacene la información analizada con formato JSON en una base de datos. Por tanto, accediendo a ella a través de otras aplicaciones como puede ser Grafana, se pueden visualizar la humedad del suelo y la temperatura de cada nodo en todo momento a través de *dashboards* y establecer alertas que notifiquen al sistema cuando se sobrepasen los límites establecidos.



The screenshot shows the ChirpStack web interface. The top navigation bar includes the ChirpStack logo, a search bar, and a user profile 'admin'. The left sidebar contains a menu with items: Network-servers, Gateway-profiles, Organizations, All users, chirpstack (selected), Org. settings, Org. users, Service-profiles, Device-profiles, Gateways, Applications, and Multicast-groups. The main content area is titled 'Applications / weather-station / Devices / rooftop' and has a 'DELETE' button. Below the title are tabs for DETAILS, CONFIGURATION, KEYS (OTAA), ACTIVATION, DEVICE DATA (selected), and LORAW. A row of action buttons includes HELP, PAUSE, DOWNLOAD, and CLEAR. The main data area shows a table with two rows. The first row is '2:34:44 PM uplink'. The second row is '2:34:44 PM status' and is expanded to show a JSON object: 

```
applicationID: "3"
applicationName: "weather-station"
battery: 255
batteryLevel: 0
batteryLevelUnavailable: true
devEUI: "0101010101010101"
deviceName: "rooftop"
externalPowerSource: false
margin: 7
```

 The third row is '2:34:15 PM uplink'.

Figura 3.11: Interfaz web de ChirpStack

## Capítulo 4

# Diseño del sistema

A lo largo de este capítulo se presenta la aplicación de todo el desarrollo teórico anteriormente presentado de una forma experimental para llevar a cabo un diseño real del sistema en su conjunto que pueda dar una buena solución al problema planteado en este proyecto. Se pretende comenzar por tanto probando diferentes prototipos de bobinados basados en las conclusiones sobre inducción electromagnética del apartado 2.3.6. para luego centrarse en cuál de ellos puede aportar mejores resultados al proyecto, comprobando así su valor en tensión inducida con respecto a la suministrada y a la linealidad de las muestras a diferentes niveles de humedad del suelo para una mayor precisión en la lectura de los datos. Además, se desarrollará un circuito de alimentación de la bobina primaria para su total autonomía y con ello poder prescindir del suministro de potencia a través de un despliegue de cableado eléctrico en el terreno de cultivo, basándose así en el circuito integrado 555 para generar señales de corriente variables en el tiempo similares a las que se han usado en la experimentación de los prototipos de bobinas.

Debido a la situación de crisis global pandémica causada por la presencia del virus SARS-CoV-2 y, por ello, no poder contar con la instrumentación de laboratorio necesaria para la caracterización de las señales de corriente inducida que circulan a través de las bobinas, el desarrollo se centra primero en el propio circuito de alimentación para generar dichas señales a partir de los conocimientos adquiridos sobre electrónica. Se debe tener en cuenta que la única forma de controlar dichas señales sin usar la instrumentación de laboratorio es mediante el uso de un multímetro capaz de medir de forma aproximada la frecuencia y ciclo de trabajo de la señal y la tensión en los nodos del circuito, tanto en continua como en alterna para conocer las corrientes que circulan por el sistema de bobinas y de la tensión de salida que se pretende medir con el módulo ESP32 a través de sus pines ADC. Por tanto, esto provocará que la adaptación del mismo a las condiciones ideales será de una forma aproximada y no tan precisa como se lograría mediante el estudio dotado de dichas herramientas de laboratorio, lo que hace más complejo su análisis.

Por último, para proporcionarle la conectividad necesaria, se desarrollará una red LoRaWAN privada mediante el uso de dos módulos TTGO ESP32 LoRa como nodo final y *gateway* junto con una Raspberry Pi 3B+ para la puesta en marcha de los servidores de red y de aplicación de LoRaServer correspondientes, así como de su integración con una aplicación real para la monitorización y el control de este sistema de lectura de humedad del suelo. Finalmente, todo ello se implementará de forma conjunta para lograr un prototipo final del sistema que será probado en un entorno real bajo tierra para medir la humedad del suelo de cultivo.

## 4.1. Implementación del circuito de alimentación

Con el objetivo de localizar las frecuencias de resonancia para los diferentes prototipos de sistemas de bobinas, es ahora el momento de desarrollar un circuito de alimentación que permita generar una corriente alterna lo más parecida posible a las señales sinusoidales con las que se van a experimentar en bobinas pues, dado que se pretende ganar autonomía, se utilizará un circuito integrado oscilador como es el 555 y una serie de componentes para obtener esa señal de salida con la frecuencia deseada a partir de una fuente de tensión como pueden ser una pila o una batería.

### 4.1.1. Primera toma de contacto con el Circuito Integrado 555

Para comenzar a familiarizarse con el circuito de alimentación, se ha realizado una fase previa de pruebas de su pieza más elemental: el circuito integrado 555. Para ello, se ha utilizado un modelo NE555P del fabricante Texas Instruments[28] en configuración astable, tal y como se ha visto con la Figura 3.2. Para este caso, se ha utilizado una  $R_A$  de  $10\text{k}\Omega$  y una  $R_B$  de  $100\text{k}\Omega$  con el fin de obtener un *duty cycle* de aproximadamente el 50 %, tal y como se ha expresado mediante la Ecuación 3.2. Una vez montado el esquema sobre la protoboard (Figura 4.1), se ha dispuesto una salida con un diodo LED, con el fin de obtener un resultado más visual; conectado en serie con una resistencia de  $1\text{k}\Omega$  para limitar la corriente que circula por éste. También se han empleado tres condensadores electrolíticos de  $10\mu\text{F}$  conectados en serie entre el pin de *Threshold* y la masa para lograr capacidades de diferentes valores y, por tanto, diferentes frecuencias.

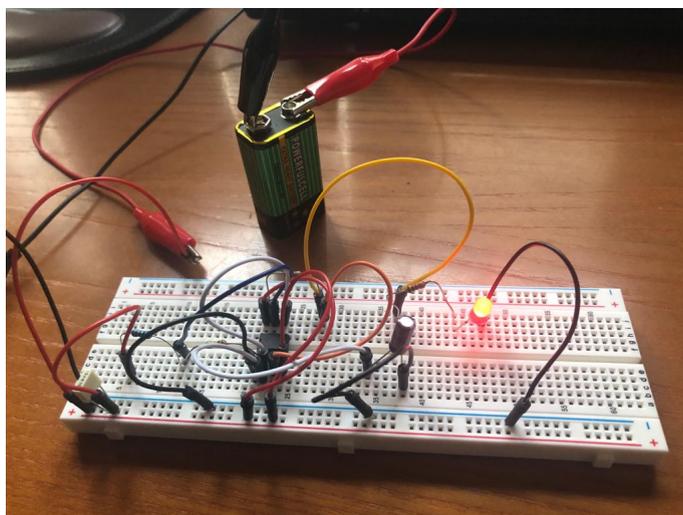


Figura 4.1: Circuito de prueba del NE555P

Con ello, si la masa se conecta a la patilla del cátodo de un primer condensador, el valor de la capacidad será de  $10\mu\text{F}$ , mientras que si se conecta al cátodo de un segundo o un tercer condensador colocados en serie con el primero se pueden lograr capacidades más pequeñas de  $5\mu\text{F}$  y de  $3.33\mu\text{F}$ , respectivamente, pues la unión en serie de condensadores es la inversa de la suma de sus admitancias, por lo que se consiguen la mitad y una tercera parte del valor original. Según el cálculo teórico mediante la Ecuación 3.1, las frecuencias para el primer, el segundo y el tercer caso serán  $0.687\text{Hz}$ ,  $1.374\text{Hz}$  y  $2.062\text{Hz}$ , respectivamente. Gracias al multímetro con el que se cuenta y que, según su manual de usuario, es capaz de

medir la frecuencia y el *duty cycle* de una señal variable de hasta 9MHz, se puede llevar a cabo una comparativa entre lo analizado teóricamente y lo obtenido experimentalmente (Tabla 4.1).

| Número de condensadores en serie    | 1            | 2             | 3             |
|-------------------------------------|--------------|---------------|---------------|
| Valor real de la capacidad, C       | 9.89 $\mu$ F | 5.031 $\mu$ F | 3.336 $\mu$ F |
| Valor real de la frecuencia, f      | 0.7Hz        | 1.36Hz        | 2.19Hz        |
| Valor real del duty cycle, D        | 51.8 %       | 52.3 %        | 51.6 %        |
| Corriente pico de salida, $I_{out}$ | 115mA        | 115mA         | 115mA         |

Tabla 4.1: Valores obtenidos experimentalmente de la prueba 1 del NE555P

Como se ha comprobado, se obtienen valores de frecuencia muy aproximados a los calculados de forma teórica. Cabe mencionar que se ha utilizado una pila de 9V que suministra aproximadamente unos 264mA. Con dicha tensión a la entrada se obtiene una corriente de salida de unos 115mA cuando la salida están en nivel alto (1 lógico). Por supuesto, si se reduce la carga a su salida esa corriente aumentará, aunque nunca por encima de los 200mA que establece el fabricante como límite en su *datasheet*. Si se mide con el multímetro la corriente que circula a su salida, sin carga mas que la propia del dispositivo medidor, el valor máximo que se puede alcanzar con este circuito integrado es de unos 174mA. El resto de esa corriente suministrada va a parar a los divisores de tensión anteriormente comentados con el circuito interno del oscilador 555 para establecer los umbrales en la comparación con la señal entre los extremos del condensador principal.

Ahora se pretende llevar a cabo el mismo experimento para frecuencias mayores cambiando el valor de la capacidad mediante uniones en serie y en paralelo de un surtido de condensadores con los que se cuentan para obtener valores adicionales. Cuanto menor sea ésta, mayor será la frecuencia de los pulsos. El valor del voltaje no afectará al resultado, pues en el divisor de tensión se escala a una y dos terceras partes del voltaje original para la comparación con la tensión en los extremos del condensador. Sin embargo, según su *datasheet* y como se verá a continuación, este modelo está limitado en frecuencia, por lo que no se garantiza la relación entre la capacidad y la frecuencia a partir de los 100kHz. Para ello, se van a sustituir las resistencias  $R_A$  y  $R_B$  por valores de 1k $\Omega$  y 10k $\Omega$ , respectivamente, y así poder lograr frecuencias superiores, según la Ecuación 3.1.

Como se puede apreciar en la Tabla 4.2, la realidad se aproxima bastante al análisis realizado de forma teórica para el uso de capacidades que permitan frecuencias por debajo de los 100kHz que anuncia el fabricante en el *datasheet* como valor límite, aunque los valores de frecuencia obtenidos experimentalmente quedan siempre ligeramente por debajo debido a las propias limitaciones del dispositivo y el error de medición de las capacidades. Sin embargo, una vez supera dicho límite, la frecuencia deja de aproximarse y se queda estancada en torno a los 240kHz, mientras la teórica llega a alcanzar valores por encima de los 3MHz. Por tanto, el circuito integrado NE555P no puede ser considerado en este proyecto dado que su frecuencia máxima, para la cual a partir de ella no se garantiza esa forma de onda, está por debajo de aquellas con la que se prevén resultados en la posterior experimentación con los diferentes prototipos de bobinas, según el estudio consultado[34]. No se ha visto variación en la corriente pico de salida ni en el *duty cycle*, el cual se aproximaba en todo momento a ese 50%. Se debe tener en cuenta que existe cierto margen de error en las mediciones del multímetro, pues debido a su inexactitud las muestras han oscilado en torno al valor que aparece en la tabla, el cual es el promedio de tres medidas para cada uno de los valores de la frecuencia.

| Valor | $C_{real}$    | $f_{teo}$ | $f_{real}$ | Duty Cycle |
|-------|---------------|-----------|------------|------------|
| 1     | 10.47 $\mu$ F | 6.57Hz    | 6.44Hz     | 51 %       |
| 2     | 5.05 $\mu$ F  | 13.6Hz    | 12.91Hz    | 52 %       |
| 3     | 3.35 $\mu$ F  | 20.5Hz    | 20Hz       | 54 %       |
| 4     | 398.2nF       | 173Hz     | 162Hz      | 52 %       |
| 5     | 301.6nF       | 228Hz     | 212Hz      | 52 %       |
| 6     | 193.6nF       | 356Hz     | 331Hz      | 52 %       |
| 7     | 97.2nF        | 708Hz     | 660Hz      | 53 %       |
| 8     | 51.1nF        | 1.35kHz   | 1.29kHz    | 52 %       |
| 9     | 40.94nF       | 1.68kHz   | 1.58kHz    | 52 %       |
| 10    | 30.9nF        | 2.23kHz   | 2.21kHz    | 52 %       |
| 11    | 20.4nF        | 3.38kHz   | 3.25kHz    | 51 %       |
| 12    | 10.2nF        | 6.74kHz   | 5.25kHz    | 50 %       |
| 13    | 5.1nF         | 13.5kHz   | 12.25kHz   | 52 %       |
| 14    | 3.46nF        | 19.9kHz   | 18.06kHz   | 50 %       |
| 15    | 480pF         | 143kHz    | 106.1kHz   | 52 %       |
| 16    | 380pF         | 181kHz    | 132.1kHz   | 53 %       |
| 17    | 270pF         | 255kHz    | 178.8kHz   | 52 %       |
| 18    | 140pF         | 181kHz    | 178.8kHz   | 50 %       |
| 19    | 80pF          | 861kHz    | 241.6kHz   | 51 %       |
| 20    | 40pF          | 1.72MHz   | 240.8kHz   | 52 %       |
| 21    | 20pF          | 3.44MHz   | 239.4kHz   | 52 %       |

Tabla 4.2: Valores obtenidos experimentalmente de la prueba 2 del NE555P

Si ahora se representan los valores experimentales obtenidos junto con los teóricos en escala logarítmica en una gráfica para acercar sus diferentes órdenes de magnitud, desde los picofaradios hasta los microfaradios, se obtiene el resultado de la Figura 4.2.

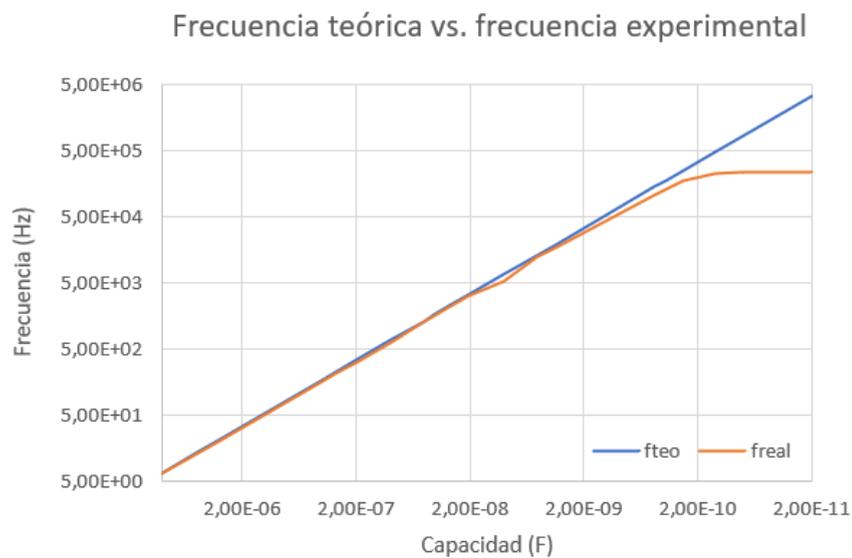


Figura 4.2: Frecuencia obtenida en función de la capacidad

Para solucionar dicho problema, se puede utilizar un circuito integrado basado en la misma arquitectura del 555: el ICM7555[35] (Figura 4.3) que, a diferencia del anterior, está implementado con tecnología basada en transistores CMOS, con lo que al lograr una mayor velocidad de conmutación se alcanza también un mayor rango de frecuencias. La formulación que aparece en el *datasheet* para calcular la frecuencia de trabajo tampoco difiere apenas del anterior modelo. Lo único que sí varía es el rango de valores de la tensión de entrada, desde los 5V hasta los 18V, aumentando así el límite superior en 3V. La corriente de salida sigue estando limitada, aunque esta vez se reduce a unos 100mA.



Figura 4.3: ICM7555 vs. NE555P

Si ahora se realiza de nuevo un estudio experimental del comportamiento del circuito integrado ICM7555 para los mismos valores de capacitancias del anterior modelo se obtienen los resultados de la Tabla 4.3.

| Valor | $C_{real}$    | $f_{teo}$ | $f_{real}$ | Duty Cycle |
|-------|---------------|-----------|------------|------------|
| 1     | 10.47 $\mu$ F | 6.57Hz    | 6.11Hz     | 52 %       |
| 2     | 5.05 $\mu$ F  | 13.6Hz    | 12.67Hz    | 52 %       |
| 3     | 3.35 $\mu$ F  | 20.5Hz    | 19Hz       | 52 %       |
| 4     | 398.2nF       | 173Hz     | 160Hz      | 52 %       |
| 5     | 301.6nF       | 228Hz     | 211Hz      | 52 %       |
| 6     | 193.6nF       | 356Hz     | 314Hz      | 51 %       |
| 7     | 97.2nF        | 708Hz     | 597Hz      | 52 %       |
| 8     | 51.1nF        | 1.35kHz   | 1.24kHz    | 52 %       |
| 9     | 40.94nF       | 1.68kHz   | 1.69kHz    | 50 %       |
| 10    | 30.9nF        | 2.23kHz   | 2.07kHz    | 52 %       |
| 11    | 20.4nF        | 3.38kHz   | 3.08kHz    | 53 %       |
| 12    | 10.2nF        | 6.74kHz   | 5.9kHz     | 52 %       |
| 13    | 5.1nF         | 13.5kHz   | 12.2kHz    | 52 %       |
| 14    | 3.46nF        | 19.9kHz   | 18.2kHz    | 51 %       |
| 15    | 480pF         | 143kHz    | 121.4kHz   | 52 %       |
| 16    | 380pF         | 181kHz    | 150.4kHz   | 54 %       |
| 17    | 270pF         | 255kHz    | 209.6kHz   | 52 %       |
| 18    | 140pF         | 481kHz    | 360.6kHz   | 52 %       |
| 19    | 80pF          | 861kHz    | 468.9kHz   | 51 %       |
| 20    | 40pF          | 1.72MHz   | 505kHz     | 52 %       |
| 21    | 20pF          | 3.44MHz   | 523kHz     | 50 %       |

Tabla 4.3: Valores obtenidos experimentalmente de la prueba 1 del ICM7555

El valor de la frecuencia máxima se ha elevado sobre los 525kHz, aproximadamente lo que ofrece el fabricante a través de su *datasheet*. Ahora, pese a que los datos experimentales siguen difiriendo con respecto a los teóricos a frecuencias elevadas, sí se logran las frecuencias con las que se esperan resultados durante la experimentación con las bobinas.

Una vez estudiado el comportamiento de estos osciladores en función de la frecuencia y comprobado que el circuito integrado ICM7555 es capaz de abarcar un mayor rango de frecuencias, ya se puede pasar a trabajar en el propio circuito de alimentación de las bobinas.

#### 4.1.2. Diseño del circuito de alimentación a partir del ICM7555

Para comenzar a diseñar el circuito de alimentación de la bobina primaria, es necesario partir del circuito anterior con el ICM7555 en configuración astable. Con ello y con los conocimientos adquiridos a lo largo de esta etapa universitaria junto con toda la investigación previa vista en apartados anteriores, se ha decidido llevar a cabo un circuito capaz de invertir una señal DC de una pila a partir del circuito integrado para alimentar la bobina con corrientes AC y así lograr valores de tensión pico a pico superiores a los que se obtendrían únicamente con los pulsos cuadrados generados a partir del 555 pues, como se vio con las Ecuaciones 2.7 y 2.9, basta con cualquier cambio de corriente en la bobina primaria para que se induzca un voltaje en la bobina secundaria, pero cuanto mayor sea la variación, mayor será dicho voltaje inducido. Por tanto, para lograr tal fin, se utilizarán dos transistores BJT, uno NPN conectado a través del colector a la fuente de alimentación y el otro PNP con su colector conectado a masa para que, en función del pulso generado por el 555 que llegue a la base de ambos, la polarización de uno esté en saturación mientras que la del otro pase a estar en corte, logrando así que la corriente que circule por la bobina conectada a los emisores de éstos y a la masa del circuito lo pueda hacer en ambos sentidos. Además, para adaptar la bobina a la frecuencia de la señal AC generada, se dispondrá de una capacidad en serie con la bobina para así hacerlo resonante y se aproveche mejor la potencia suministrada por la fuente de alimentación, comenzando a cargarse ambas (el condensador en cuanto a carga y la bobina en corriente) durante el periodo de máxima amplitud de la señal generada por el 555 y descargándose cuando la señal esté en el mínimo. Con ello, para ciclos positivos de corriente, por el NPN conducirá corriente al encontrarse en saturación, circulando toda por el condensador y la bobina ya que el PNP estará en corte, impidiendo el paso de corriente; mientras que para ciclos negativos ocurrirá justo lo contrario, así descargándose ambas a través del transistor PNP saturado, pues el NPN será el que ahora esté en corte. De esta forma, dado que la corriente que circula por el condensador crecerá sin saltos pronunciados a causa de la *f.c.e.m.* de la bobina, se logrará una señal de corriente en la bobina prácticamente sinusoidal, pues la corriente de la bobina se irá incrementando hasta llegar al punto en el que la corriente se vea limitada y comience a hacerse más pequeña a causa de la carga del condensador, repitiéndose en el sentido opuesto con la descarga del mismo. Cuanto más se aproximen los valores de la capacitancia y de la inductancia a aquellos con los que se consigue el mismo valor de frecuencia que la de la señal del 555 mediante la Ecuación 2.19, mayor será la resonancia y, por tanto, la corriente inducida. Sin embargo, para proteger al circuito de posibles corrientes no deseadas ocasionadas por el desconocimiento de la inductancia de la bobina, se han dispuesto de dos ramas en paralelo con diodos en sentido opuesto para evitar que la más leve asincronía pueda poner en riesgo al resto del circuito con dichas corrientes, pues éstas pueden ser inversas y por ende dañar la fuente de alimentación.

Adicionalmente, para obtener el valor de la tensión de salida del sistema, se ha optado por un rectificador de onda completa consistente en cuatro diodos conectados dos a dos y a los extremos de la bobina secundaria entre el ánodo del primero y el cátodo del segundo. También se emplean una capacidad y una resistencia de alto valor conectadas a los extremos de las uniones de los diodos y a masa para fijar dicha tensión de salida. De esta forma, cuanto mayor sea la corriente inducida, mayor será el valor de la carga del condensador y, por tanto, se detectará un menor o mayor nivel de humedad del suelo.

El circuito finalmente implementado a partir de las consideraciones anteriores queda de la misma forma que en la Figura 4.4.

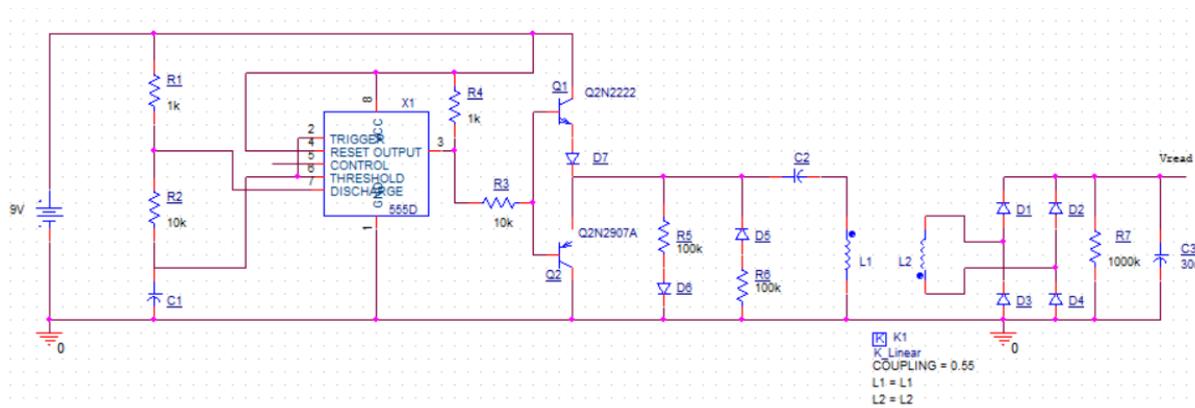


Figura 4.4: Esquemático del circuito de alimentación

A partir del circuito anterior se pueden lograr frecuencias de hasta unos 500kHz, tal y como se ha visto con el circuito integrado ICM7555. Si, por ejemplo, se pretende utilizar una frecuencia de 160kHz, la capacidad real de C1 se debe acercar a unos 420pF, teniendo en cuenta que el cálculo teórico tan solo se aproxima a la realidad quedando siempre esta última por debajo de la calculada, por lo que se debe comprobar experimentalmente que la frecuencia es tal. Si, además, se estima una inductancia primaria L1 de 1mH, mediante la Ecuación 2.19 se calcula una capacidad de C2 en torno a los 990pF. Si se introducen dichos valores en el esquemático y se simula, se obtienen las señales de corriente representadas en la gráfica de la Figura 4.5.

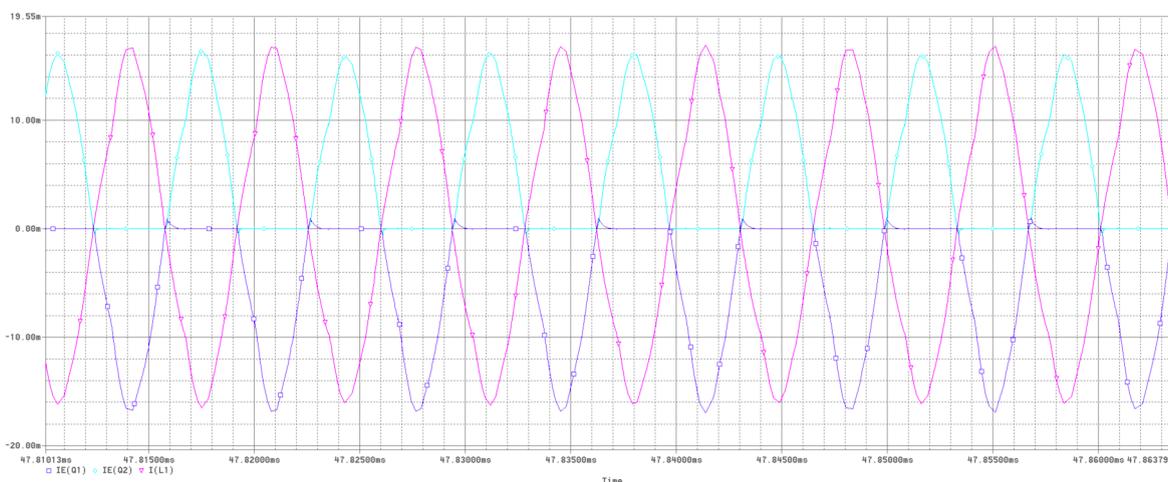


Figura 4.5: Gráfica de corrientes en emisores y la bobina primaria

Como se puede ver, la corriente que circula por la bobina primaria L1 se comporta tal y como se ha explicado con el funcionamiento de los transistores BJT. Con ello, la señal de corriente de la bobina, representada con el color magenta en la gráfica, se asemeja a la de una senoide con la frecuencia diseñada a partir de C1, pues el ciclo de trabajo para esta configuración es muy próximo al 50 % y por tanto cada transistor entra en saturación durante la mitad del periodo. Nótese que en esta representación gráfica se ha jugado con la colocación de los marcadores de corriente para poder visualizar correctamente las señales ya que las de los transistores están invertidas por lo que, si se colocasen en el mismo sentido de entrada de la corriente, la señal de corriente de la bobina se solaparía con ellas.

También, si se diseña la inductancia secundaria L2 tal que su valor sea de 2mH, el doble de la primaria, se logra la tensión de salida que se puede apreciar en la Figura 4.6. En ella se produce un crecimiento del voltaje entre los extremos del condensador hasta llegar a un valor de aproximadamente 2.8V. Aumentando R7 se puede lograr un mayor voltaje, aunque esto también hace que la mayor parte de la corriente circule entre la bobina L2 y el condensador C3, por lo que en caso de que el circuito de alimentación tuviera un *duty cycle* muy superior al 50 % o que el valor de la capacitancia fuera muy pequeño haría que el condensador se dañase, pues no podría liberarse de la carga adquirida con la bobina secundaria y ésta no puede quedarse en un circuito abierto tras cargarse, pues también podría dañarse. Además, cuanto mayor sea la capacidad C3 menor será el efecto de rizado en la señal de tensión de salida, aunque un valor muy alto de ésta puede limitar la tensión de salida a valores inferiores. Adicionalmente, el factor  $k$  tenderá a ser bajo ya que las bobinas ya se encuentran distanciadas ante un medio que no llega a favorecer la inducción entre ellas como puede ser el caso de un transformador eléctrico con núcleo magnetizado de ferrita.

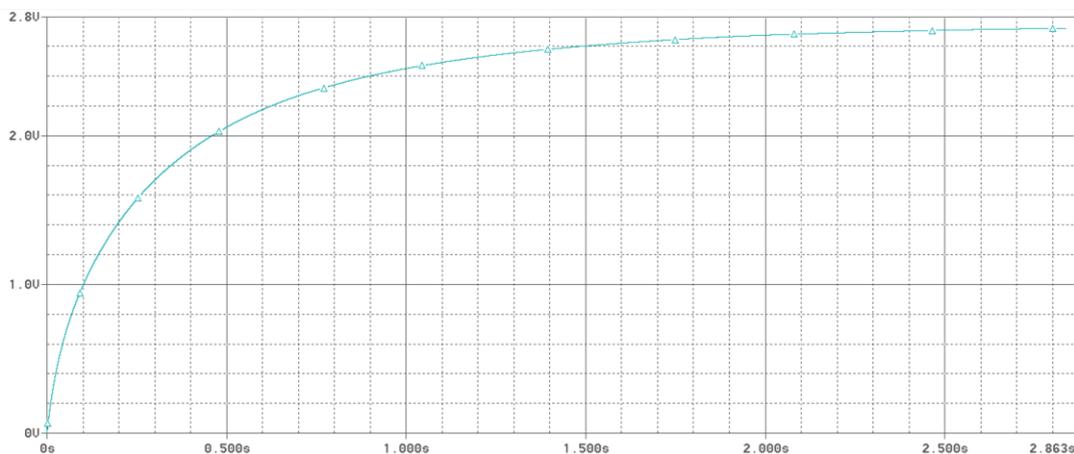


Figura 4.6: Valor de la tensión de salida del sistema en función del tiempo

La tensión de salida tarda cierto tiempo en crecer hasta mantenerse en el voltaje máximo a frecuencias altas. Esto no es problema ya que la humedad del suelo no cambia instantáneamente ni tampoco de forma brusca, por lo que el circuito presentado es suficiente para cumplir con su función de alimentar a la bobina primaria y fijar un valor de tensión de salida para que pueda ser leído por el ESP32. Si ahora, a través del factor de acoplamiento  $k$  se simula un menor grado de inducción entre las bobinas debido a un menor valor de las inductancias por la presencia de agua, se obtiene el resultado de la Figura 4.7. Esto será lo que se espera que ocurra a diferentes niveles de humedad de la tierra, siendo aún menor cuando haya mayor presencia de agua en ella, como se ha visto.

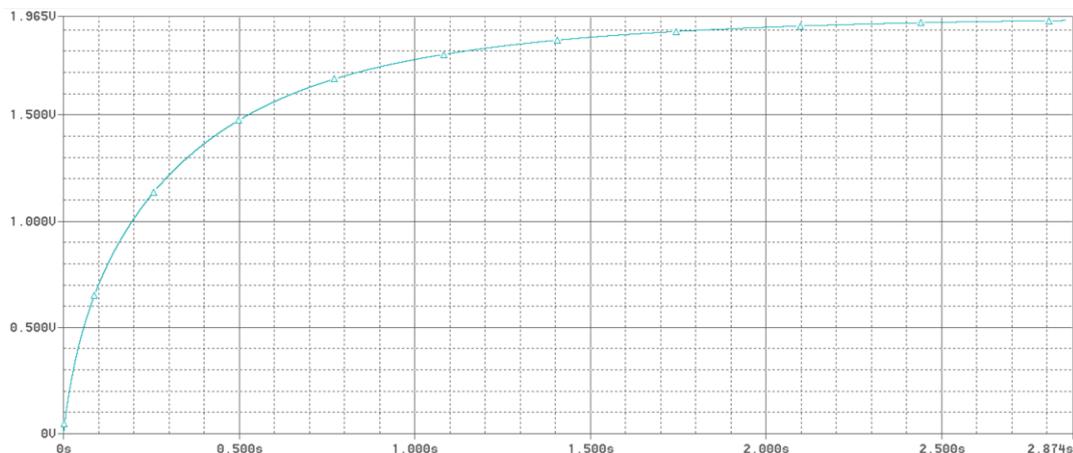


Figura 4.7: Valor de la tensión de salida del sistema con un menor acoplamiento

Una vez montado el esquema del circuito de alimentación de la Figura 4.4 sobre la *protoboard* tal y como se puede ver en la Figura 4.8, ya se puede proceder a probar los diferentes prototipos de bobinas para hallar aquella que proporcione un mayor rendimiento con el menor consumo de potencia. En él, además de las tomas de alimentación del circuito para la pila de 9V, también se tiene otras cuatro para los extremos de cada bobina: una de ellas conectada a las capacidades para la resonancia y a masa, mientras que la otra se conecta directamente a las uniones entre diodos que forman el puente rectificador. Este será el circuito final de alimentación una vez se conozca el comportamiento en frecuencia de cada prototipo a cierto nivel de humedad y que se probará una vez se tengan.

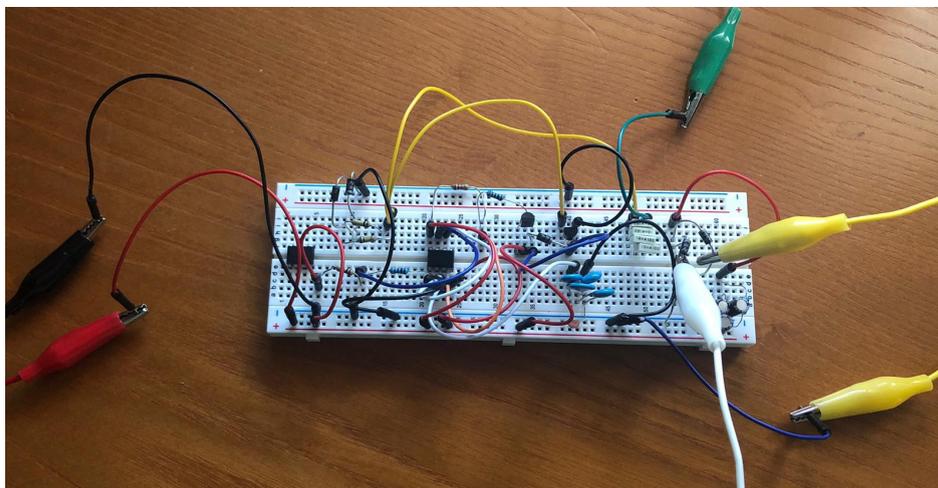


Figura 4.8: Montaje del circuito de alimentación

Sin embargo, dada la complejidad de adaptación de las capacidades a la inductancia desconocida y a la frecuencia generada, el circuito de alimentación se ha modificado para las pruebas con las bobinas, dejando un solo transistor, el NPN, de forma que sea éste el encargado de permitir el paso de corriente hacia la bobina primaria situada en paralelo con una resistencia. También se utiliza una resistencia en el colector del transistor para limitar la corriente que pasa por él y un diodo a modo de *freewheeling* análogo al anterior esquema que impida que la corriente se mantenga circulando por el transistor y se haga constante haciendo que la bobina se convierta en un corto, sino que pase a circular en

sentido contrario por la resistencia para que la bobina pase a descargarse hasta un nuevo ciclo. Dado que en este circuito ya no existe una señal de corriente AC sobre la bobina, sí que se produce un cambio de la corriente, por lo que se induce una corriente más pequeña sobre la bobina secundaria, aunque suficiente para detectar cambios en el voltaje de salida. De esta forma, tal y como se explicó anteriormente con la resonancia del sistema basado en la inducción mutua entre bobinas, para la frecuencia de resonancia se producirá el mayor pico de tensión, distinguiéndose sobre el resto. El circuito en cuestión es el de la Figura 4.9.

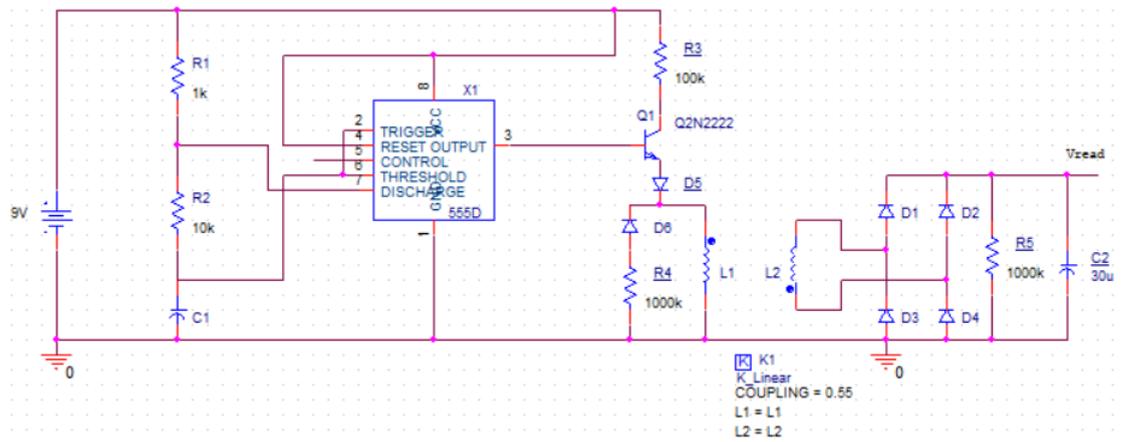


Figura 4.9: Esquema del circuito de experimentación con bobinas

De nuevo, el montaje de este circuito queda de la misma forma que el que se presenta en la Figura 4.10. Véase que se ha simplificado bastante el sistema al haber eliminado tanto el transistor PNP que permitía crear una señal de corriente AC como la capacidad que hacía resonante al circuito de alimentación con respecto a la inductancia y a la frecuencia generada. Una vez realizado, se procede a la experimentación con los diferentes tipos de bobinas alimentadas con pulsos de corriente mediante este circuito.

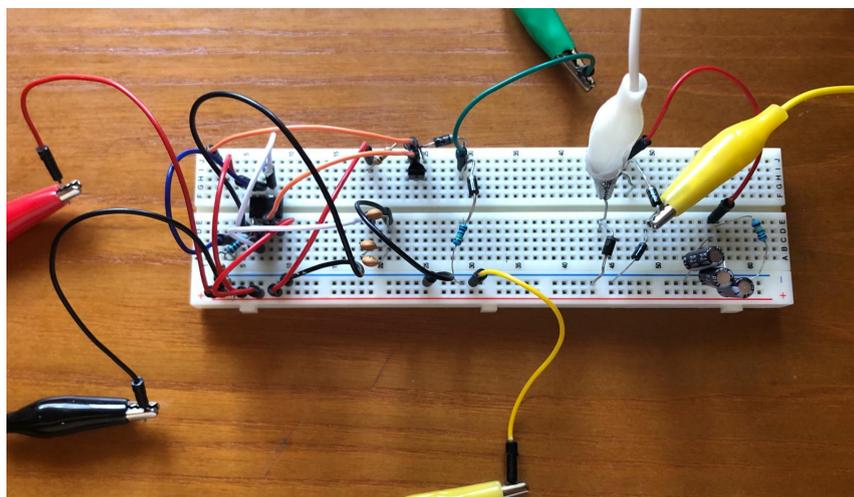


Figura 4.10: Montaje del circuito de experimentación con bobinas

## 4.2. Experimentación con diferentes tipos de bobinas

En la experimentación con las bobinas se ha utilizado la misma sección de hilo de cobre esmaltado de 0.4mm sacada de transformadores actuales. Con ello, se ha fragmentado la longitud original en otras más pequeñas para lograr las diferentes relaciones de espiras que se pretendían obtener, se han enrollado a lo largo de un cilindro a una distancia entre ellas de unos 5mm y se han limado sus extremos para hacer conexión con el resto del circuito de alimentación a través del cual se generarán las señales de corriente en un barrido de frecuencias y a diferentes niveles de humedad, reflejando su resultado en tensión inducida en la bobina secundaria.

Tal y como se ha visto en apartados anteriores, conviene tener en cuenta las conclusiones vistas en el apartado 2.3.6. De este modo, la relación de espiras de la bobina secundaria con respecto a la primaria será siempre igual o mayor a la unidad, intentando optimizar entre el número total de espiras de ambas bobinas para obtener los mejores resultados posibles en cuanto a inductancia lograda y el coste de las secciones ya que, para un gran despliegue de nodos con este tipo de sensores a diferentes niveles de profundidad del suelo, el coste total se eleva considerablemente. El radio de las bobinas tampoco puede ser muy grande por cuestiones de maniobrabilidad, pues éstas requieren medir la humedad a diferentes niveles de profundidad, por lo que cuanto mayor sea el radio más espacio ocuparán y menor precisión tendrán.

Además, con la Ecuación 2.19 se pueden conocer los valores de la frecuencia de resonancia correspondiente a los de una bobina. Sin embargo, dado que no se cuenta con equipamiento suficiente que permita obtener el valor de la inductancia construida con una o más capas ni de la permeabilidad magnética del núcleo de tierra en función del nivel de humedad, se introducen dos aproximaciones teóricas de núcleo de aire[36] basadas en la Ecuación 2.8 mediante las Ecuaciones 4.1 y 4.2, respectivamente, donde  $l$  es la longitud de la bobina y  $r$  es el radio con respecto al centro de ésta de la capa más interna de conductor mientras  $R$  lo es para la capa más externa, todos en centímetros. Nótese que esta aproximación con la que poder estimar los componentes del circuito se realiza para un núcleo de aire, acercándose así a lo que se obtendría con una gran cantidad de agua pura, por lo que este valor variará en función del tipo de tierra, su composición y la del agua que se drene a su interior. Si, por ejemplo, los minerales que componen la tierra así como los fertilizantes y pesticidas utilizados la hacen más ferromagnética a la vez que hay ausencia de agua, el valor de la inductancia se incrementará, así debiendo reducir el valor de la capacidad dispuesta en serie en el circuito de alimentación. Por tanto, no tiene sentido buscar un único valor de inductancia ya que éste variará en función de la cantidad de agua para un mismo tipo de tierra. Sin embargo, una vez conocida esta frecuencia de resonancia, hallada tras realizar un barrido de frecuencias a través de la variación de la capacidad principal del circuito integrado y como se verá más adelante, variando esta vez únicamente la capacidad en serie con la bobina primaria ya sí se puede conocer el valor real de la inductancia, pues se extremará el pico de resonancia cuando el valor de la capacidad sea tal que se cumpla la Ecuación 2.19. El objetivo de ello, más que conocer el valor de la inductancia, es conocer el valor del condensador en serie con ésta para lograr un circuito de alimentación resonante y el consumo sea lo más eficiente posible a la vez que se potencia el resultado.

$$L_{capa} = \frac{r^2 N^2}{2.54(9r + 10l)} \quad (\mu H) \quad (4.1)$$

$$L_{multicapa} = \frac{0.8r^2N^2}{2.54(6r + 9l + 10(R - r))} \quad (\mu H) \quad (4.2)$$

De estas ecuaciones, para el caso de una bobina de una sola capa con 100 espiras, radio 1.4cm y una longitud de 5cm; el valor de su inductancia se estima en torno a los  $120\mu H$ . Tampoco es posible hallar el valor de la capacidad parásita de la misma, por lo que con la aproximación de la Ecuación 4.3 y el uso del multímetro para medir capacidades, tal y como se ha visto con el cálculo de las inductancias, su valor es prácticamente despreciable a frecuencias inferiores a la de resonancia, pues su valor no llega a ser superior a los  $10pF$  para los tipos de bobinas que se tratan en este proyecto.

$$C_d = \frac{2\epsilon_r(N - 1)r}{11.45\cosh^{-1}\left(\frac{d_{gap}}{\Phi_{hilo}}\right)} \quad (pF) \quad (4.3)$$

donde  $\epsilon_r$  es la permitividad eléctrica del esmaltado,  $r$  es el radio de la bobina,  $N$  es el número de espiras,  $d_{gap}$  es la distancia entre espiras y  $\Phi_{hilo}$  es el calibre del hilo.

De esta forma, la frecuencia de resonancia de una bobina, tal y como se vio anteriormente con la Figura 2.19 con  $k=0$ , queda en el orden de los megahercios. Con esto y con el acoplamiento entre las bobinas primaria y secundaria provocado por la inductancia mutua, la frecuencia de resonancia del sistema se verá desplazada hacia frecuencias inferiores.

Una vez dicho todo esto, en la Tabla 4.4 se definen cuatro prototipos diferentes diseñados en función de todo el estudio realizado en este proyecto.

| Prototipo | Calibre hilo | Capas | $N_{primaria}$ | $N_{secundaria}$ | Relación | Diámetro |
|-----------|--------------|-------|----------------|------------------|----------|----------|
| P1        | 0.4mm        | 1     | 40             | 40               | 1:1      | 28mm     |
| P2        | 0.4mm        | 1     | 40             | 80               | 1:2      | 28mm     |
| P3        | 0.4mm        | 1     | 40             | 100              | 1:2.5    | 28mm     |
| P4        | 0.4mm        | 4     | 40             | 80               | 1:2      | 43mm     |

Tabla 4.4: Prototipos para el sistema sensor de humedad basado en bobinas

El procedimiento para realizar esta experimentación con las bobinas, tal y como se comenzó a tratar en el apartado 2.2.3, consistirá en introducir cada uno de los diferentes sistemas de bobinas en un recipiente lleno de tierra seca y algo compactada para observar el comportamiento de la tensión de salida en función de la cantidad de agua en el sistema, así para luego comprobarla para las diferentes frecuencias de corriente a través del uso de la capacidad utilizada en el circuito de alimentación en la de configuración del sistema estable del circuito integrado ICM7555. Por tanto, para un mismo nivel de humedad, se realizará tal barrido de frecuencias para hallar aquella que muestre un pico en la tensión inducida, la cual será la frecuencia de resonancia buscada. Este análisis en frecuencia, dada la falta de instrumentación de laboratorio, se realizará en función de las frecuencias logradas a partir de las capacidades de la Tabla 4.3. En concreto, se medirán cinco niveles de humedad: el 0%, el 25%, el 50%, el 75% y el 100%. De esta forma, los valores obtenidos se superpondrán para ser analizados en mayor profundidad y ver cuál ofrece también la linealidad de los valores muestreados en función del nivel de humedad, pues es el aspecto que interesa más realmente. Con ello, se utilizará la Ecuación 2.1 para definir la masa de agua que se irá empleando en cada nivel en función de la masa original de tierra seca. En este caso, se emplea un tarro por cada prototipo con aproximadamente 300g de tierra, por lo que cada nivel de humedad se corresponde con un aumento de unos 75ml de agua.

### 4.2.1. Primera toma de contacto con bobinas

Para comenzar a trabajar con las bobinas, se ha probado primero uno de los prototipos propuestos con núcleo de aire, sin llegar a enterrarlo. En concreto, se trata del segundo prototipo propuesto de la Tabla 4.4, con una relación de espiras 1:2.5. De esta forma, se ha conectado al circuito de experimentación de la Figura 4.10 y se ha medido la tensión DC en su salida, es decir, entre los extremos de las capacidades que se sitúan en paralelo con el puente rectificador de diodos. El resultado para una frecuencia de trabajo de unos 120kHz ha sido el de la Figura 4.11.

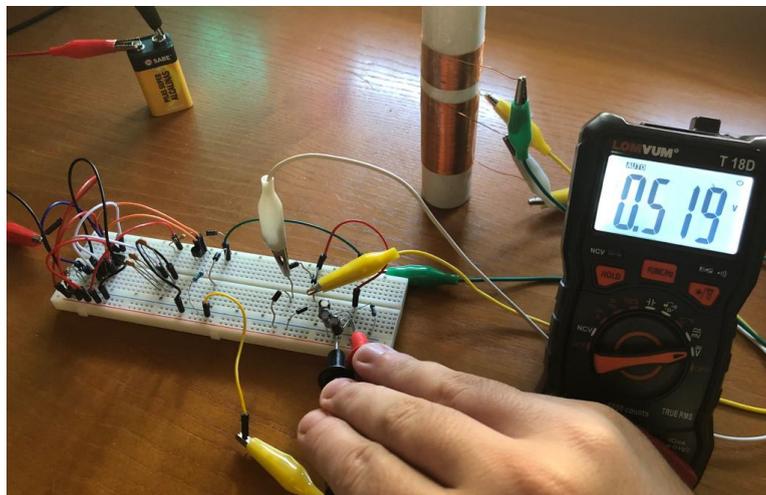


Figura 4.11: Prueba del circuito de experimentación con bobina de núcleo de aire

Como se ha podido comprobar, la tensión de salida se mantiene en torno a 0.5V tras haber transcurrido entre 2 y 3 segundos. Sin embargo, si se introduce un núcleo de ferrita extraído del mismo transformador, se obtiene el resultado de la Figura 4.12.

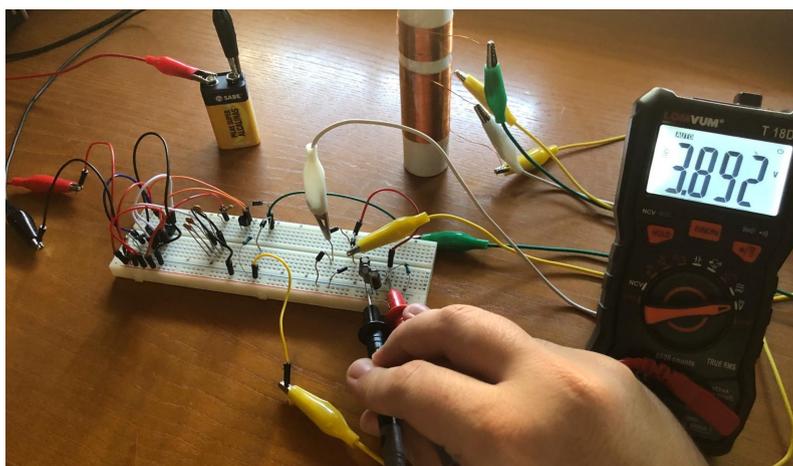


Figura 4.12: Prueba del circuito de experimentación con bobina de núcleo de ferrita

Ahora, la tensión de salida se ha elevado considerablemente hasta cerca de los 3.9V. Esto se debe a que la ferrita es un material ferromagnético y, por tanto, concentra aún más el flujo magnético que atraviesa la bobina secundaria. Es lógico pensar que la tierra, pese a no conocer su composición, no está magnetizada y no se obtendrán resultados tales

como los obtenidos con el núcleo de ferrita, por lo que la tensión de salida se quedará muy por debajo de tal valor; pero sí que elevará un poco más sobre el valor de tensión de salida obtenido con el núcleo de aire en el caso de encontrarse elementos ferromagnéticos como los citados en anteriores puntos del documento. Si ahora se le modifica al primer sistema con núcleo de aire la frecuencia de la señal de corriente generada a partir de la capacidad principal para utilizar una muy inferior a la anterior como pueden ser 4.5kHz, tal y como se puede apreciar en la Figura 4.13, el voltaje inducido decrece hasta los 0.13V, lo que significa que se está alejando de la frecuencia de resonancia.

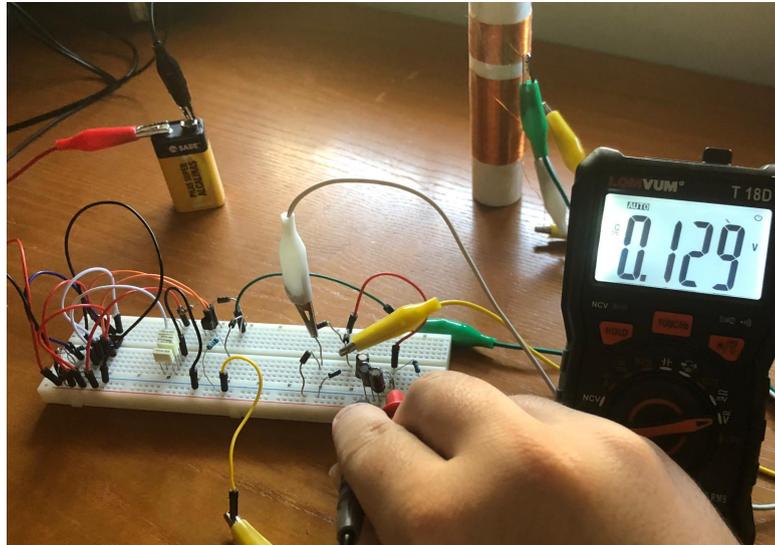


Figura 4.13: Prueba del circuito de experimentación con bobina a menor frecuencia

Si en cambio se aumenta la frecuencia hasta aproximadamente los 160kHz, tal y como se ha hecho en la Figura 4.14, se aprecia una ligera subida en el voltaje de salida hasta los 0.58V, lo que implica que esta frecuencia se acerca un poco más al pico de resonancia.

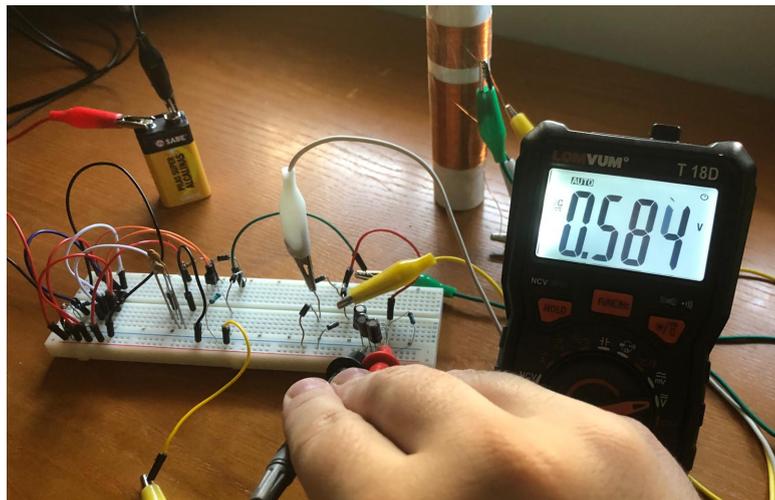


Figura 4.14: Prueba del circuito de experimentación con bobina a mayor frecuencia

Con todo ello, se ha demostrado que el sistema planteado funciona tal y como se ha visto en las Figuras 4.6 y 4.7, así comprobando que funciona correctamente. De este modo, se

puede comenzar con la experimentación con cada uno de los prototipos propuestos para el sensor de humedad del suelo de cultivo basado en bobinas. Con este sistema, como ya se ha comentado, se busca localizar el pico de tensión inducida para la frecuencia de resonancia a medida que se vaya disminuyendo el valor de la capacidad conectada al circuito oscilador y, con ello, aumentando el valor de la frecuencia de la señal generada. Estas frecuencias son las halladas con el circuito integrado ICM7555 con un surtido de capacidades limitado y definidas en la Tabla 4.3, por lo que la frecuencia de resonancia tratará de acercarse de la forma más exacta posible mediante la unión en serie y/o en paralelo de dichas capacidades, aunque es muy probable que, al tratarse de un esquema muy elemental dadas las circunstancias, la frecuencia real de resonancia se vea algo desplazada y el pico de tensión inducida sea aún mayor en función del factor Q de la Ecuación 2.20, pero sí que puede ser una buena aproximación a éste y aprovechar la potencia suministrada por la pila. Sin embargo, el aspecto más relevante en este proyecto, más que hallar este pico de tensión para optimizar el consumo de energía con una fuente de alimentación más pequeña, es lograr la linealidad de los valores de las diferentes muestras de humedad a una determinada frecuencia, pues será el dato que lea el módulo ESP32 LoRa e interesa que sea lo más preciso posible. Además, dado que las inductancias de las bobinas se verán alteradas por la presencia de agua, interesa la frecuencia de resonancia hallada estando la tierra húmeda, es decir, con un 100 % de humedad, pues será el valor máximo tomado como referencia del prototipo candidato para luego llevarlo al circuito de alimentación de la Figura 4.8 y con ello comprobar el comportamiento de éste a diferentes niveles de tensión. También, dado que se irá añadiendo agua conforme al nivel de humedad, se dejará reposar alrededor de 1-2 horas para que el agua drene hasta las bobinas.

A continuación, en la Figura 4.15, se presentan los diferentes prototipos reales de bobinas con los que se experimenta. En este caso, se trabaja con tierra extraída de un espacio de cultivo fértil localizado en la vega granadina para recrear de la mejor forma posible un caso real; mientras que el agua proviene del sistema de grifería doméstico.



Figura 4.15: Prototipos reales de bobinas utilizados para la experimentación

#### 4.2.2. Experimentación con el primer prototipo

En este primer prototipo se prueba un sistema de una sola capa con una relación de espiras 1:1, con 40 espiras tanto la primaria como la secundaria. Además, su diámetro es de 2.7cm. En las gráficas de las Figuras 4.16 y 4.17 se pueden ver los resultados obtenidos tras medir los valores de tensión de salida a diferentes frecuencias y niveles de humedad.

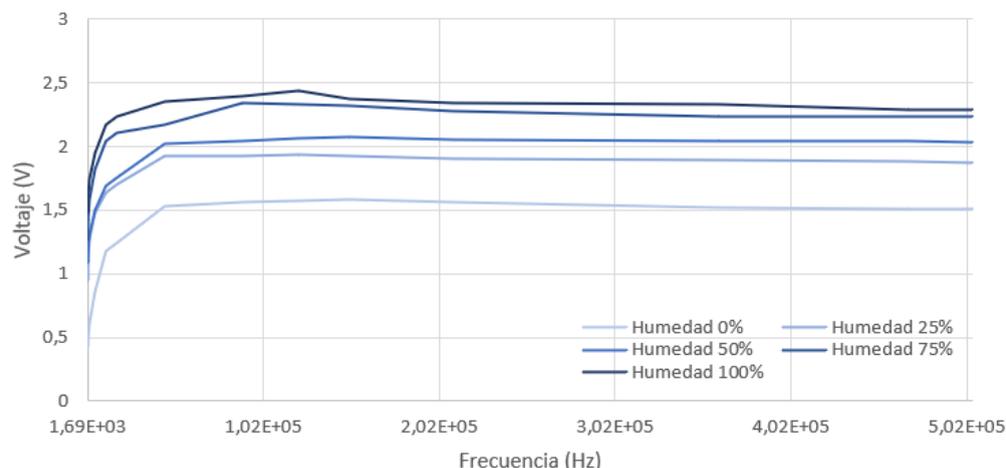


Figura 4.16: Experimentación con el prototipo 1 (a)

Como se puede apreciar, la corriente inducida aumenta conforme se eleva la cantidad de agua presente en este tipo de compuesto de la tierra. Este comportamiento creciente se presenta en la mayoría de frecuencias muestreadas, aunque en algunas éste es más abrupto que en otras. Generalmente, este crecimiento puede deberse a que el contenido del agua sea más ferromagnético que el de la tierra ya que no cuenta con pesticidas ni abonos, como es el caso del compuesto. Es posible también que la cal utilizada para el tratamiento del agua influya en gran medida. De estos resultados se puede concluir también con un pico de tensión máxima de unos 2.4V cercano a los 120kHz, por lo que como, se ve en la Figura 4.16, su frecuencia de resonancia puede estar en torno a ésta.

En la Figura 4.17 se puede apreciar mejor la pseudo-linealidad entre las diferentes muestras tomadas para los distintos niveles de humedad con una frecuencia de unos 210kHz.

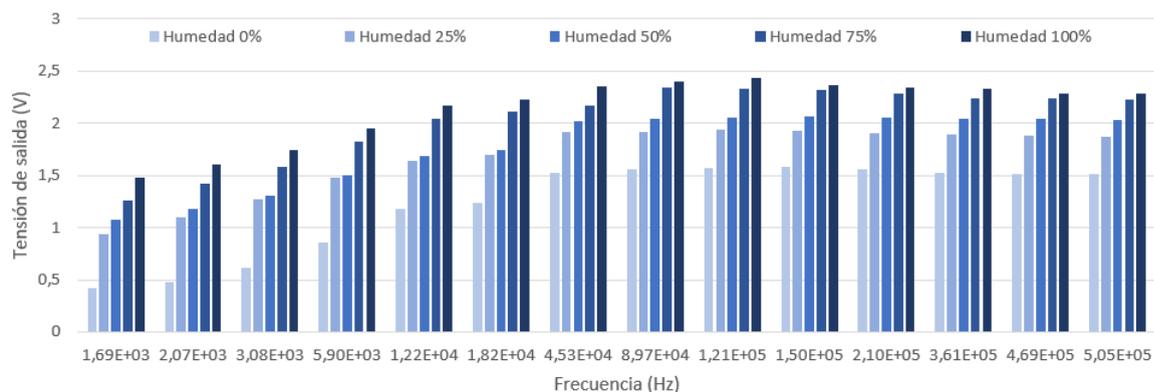


Figura 4.17: Experimentación con el Prototipo 1 (b)

Este tipo de bobinado cuenta con una única vuelta y es relativamente pequeño por lo que, al parecer no contar con un factor de calidad Q alto, no se ha podido estimar una frecuencia de resonancia con mayor exactitud ya que la tensión de salida máxima no es muy pronunciada, aunque sí se puede observar que el crecimiento es aproxima bastante a la linealidad a frecuencias cercanas a los 210kHz, lo que convierte a este prototipo en un buen candidato para su inclusión en el diseño final del sistema.

### 4.2.3. Experimentación con el segundo prototipo

En este segundo prototipo se prueba un sistema de una sola capa con una relación de espiras 1:2, con 40 espiras en la primaria y 80 espiras en la secundaria. Adicionalmente, su diámetro es de nuevo de unos 2.7cm. En las gráficas de las Figuras 4.18 y 4.19 se pueden ver los resultados obtenidos tras medir los valores de tensión de salida a diferentes frecuencias y niveles de humedad.

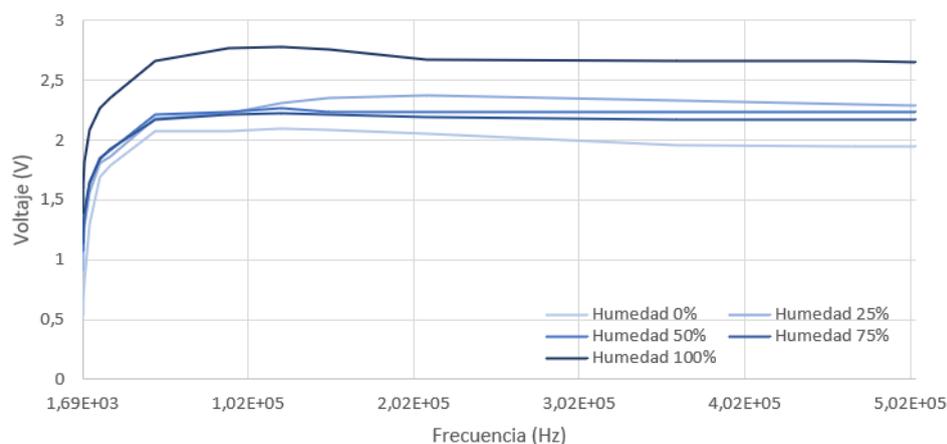


Figura 4.18: Experimentación con el Prototipo 2 (a)

Para este caso se obtiene un mayor pico de corriente inducida, tal y como se esperaba al contar con un mayor número de espiras en la bobina secundaria. Sin embargo, ya no se produce ese crecimiento progresivo conforme aumenta el nivel de la humedad, sino que a valores intermedios llega a mantenerse en la misma tensión que niveles inmediatamente anteriores o incluso a disminuir ligeramente en el rango de frecuencias superiores. Tampoco se llega a reconocer la frecuencia de resonancia, aunque todo indica a que pueda estar entre los 45kHz y los 120kHz. Nótese por tanto el cambio de una tendencia creciente a una decreciente una vez sobrepasado este punto. Además, se produce un salto de voltaje muy abrupto cuando el nivel de humedad crece hasta el 100 %, llegando hasta los 2.8V. Todo ello hace que este prototipo no sea aceptable como sensor de humedad en estas condiciones ya que a tensiones más bajas donde se ha hallado cierta linealidad el sistema se hace más inestable, como se ha observado por varios ensayos durante la experimentación.

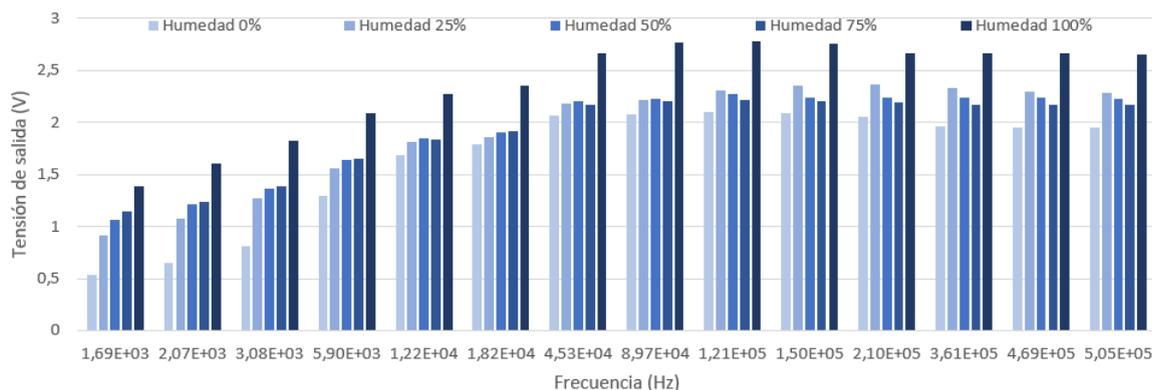


Figura 4.19: Experimentación con el Prototipo 2 (b)

## 4.2.4. Experimentación con el tercer prototipo

En este tercer prototipo se prueba un sistema de una sola capa con una relación de espiras 1:2.5, con 40 espiras en la primaria y con 100 espiras en la secundaria. Además, su diámetro es de 2.7cm. En las gráficas de las Figuras 4.20 y 4.21 se pueden ver los resultados obtenidos tras medir los valores de tensión de salida a diferentes frecuencias y niveles de humedad.

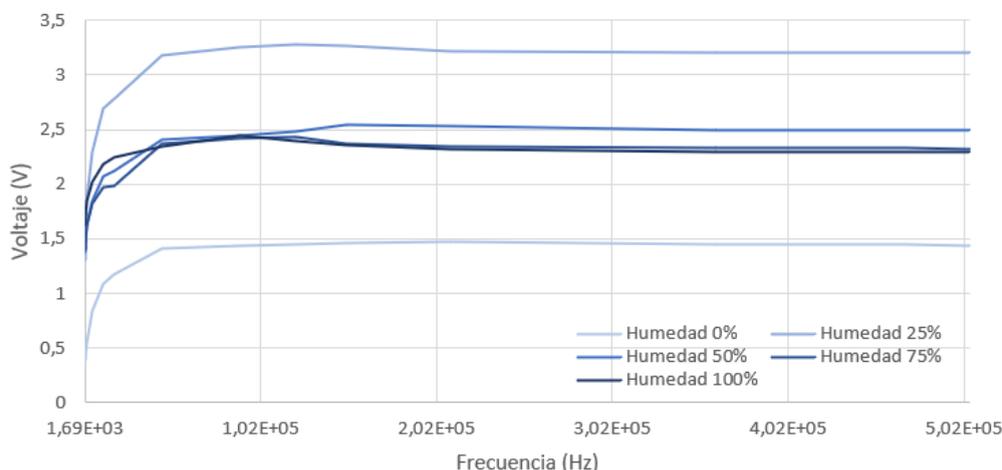


Figura 4.20: Experimentación con el Prototipo 3 (a)

De nuevo, con este prototipo ocurre algo similar a lo acontecido con el anterior, pues vuelve a producirse cierto decrecimiento del nivel de tensión a niveles de humedad intermedios a la vez que se produce un pico desproporcionado para cierta cantidad de agua, esta vez coincidiendo con el 25 % de humedad para toda la serie, con un máximo de unos 3.3V. Tampoco se ha logrado en este caso localizar la frecuencia de resonancia del sistema pese a parecer estar próxima a los 90kHz, pues el sistema comienza una tendencia a la baja conforme aumenta el nivel de humedad. Por todo ello, este prototipo parece no ser tampoco adecuado para el entorno en el que se trabaja en este proyecto ya que se detectarán valores de humedad más bajos que la realidad.

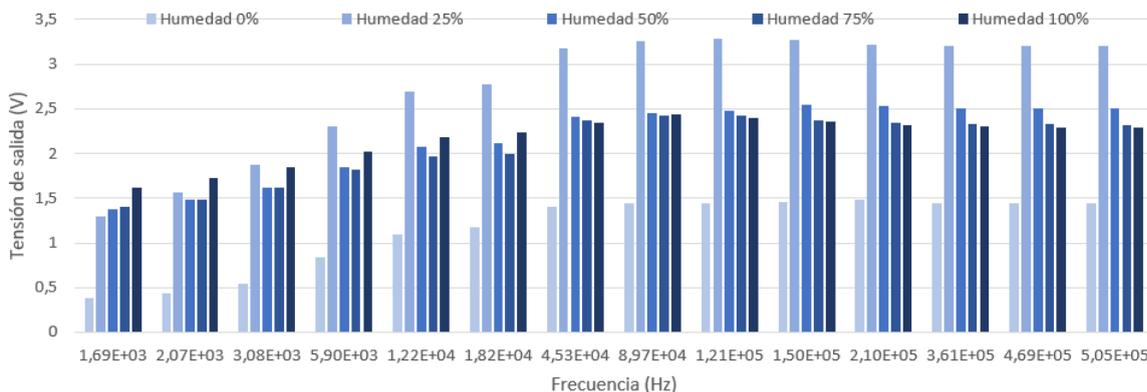


Figura 4.21: Experimentación con el Prototipo 3 (b)

### 4.2.5. Experimentación con el cuarto prototipo

En este cuarto prototipo se prueba un sistema con una relación de espiras 1:2, con 40 espiras en la primaria y con 80 espiras en la secundaria. Ahora su diámetro pasa a ser de 4.3cm y se realiza en cuatro capas de 10 espiras la primaria y 20 la secundaria. En las gráficas de las Figuras 4.22 y 4.23 se pueden ver los resultados obtenidos tras medir los valores de tensión de salida a diferentes frecuencias y niveles de humedad.

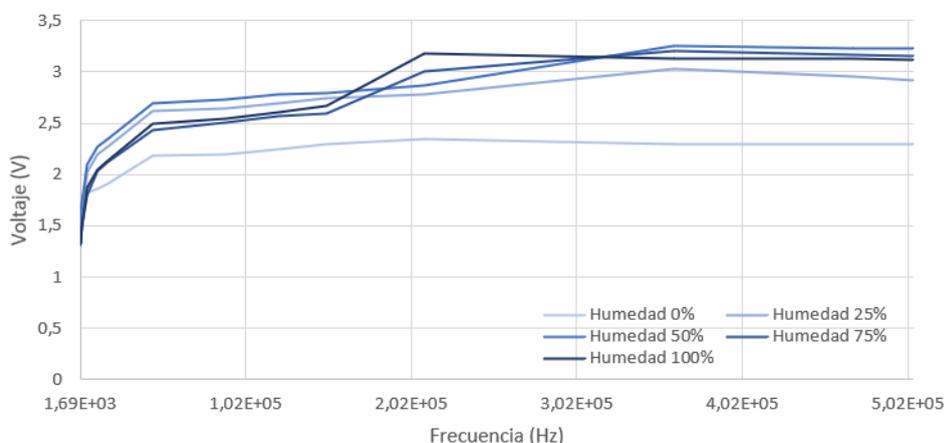


Figura 4.22: Experimentación con el Prototipo 4 (a)

Ahora, ya no se producen tales picos de tensión tan diferenciados para un mismo nivel de humedad, aunque apenas existe crecimiento o decrecimiento en la tensión de salida ya que su comportamiento a los diferentes niveles de humedad se hace algo más uniforme para la mayoría de las frecuencias. Sin embargo, para frecuencias próximas a los 210kHz, se produce un crecimiento más progresivo, aunque sigue habiendo un escalón importante entre el 0% y el 25% de la humedad en comparación con el salto que se produce entre el resto de niveles. Su pico de resonancia, al lograr una mayor inductancia en ambas bobinas, se hace algo más visible que para los casos anteriores, así pareciendo establecerse cerca de los 250kHz y acercándose a la máxima linealidad del conjunto. Pese a ello, este prototipo tampoco se puede llegar a considerar en este proyecto a fin de utilizarse como sensor de humedad debido a que no llega a producirse el cambio lo suficientemente lineal, aunque se podría tratar de una alternativa al primer prototipo.

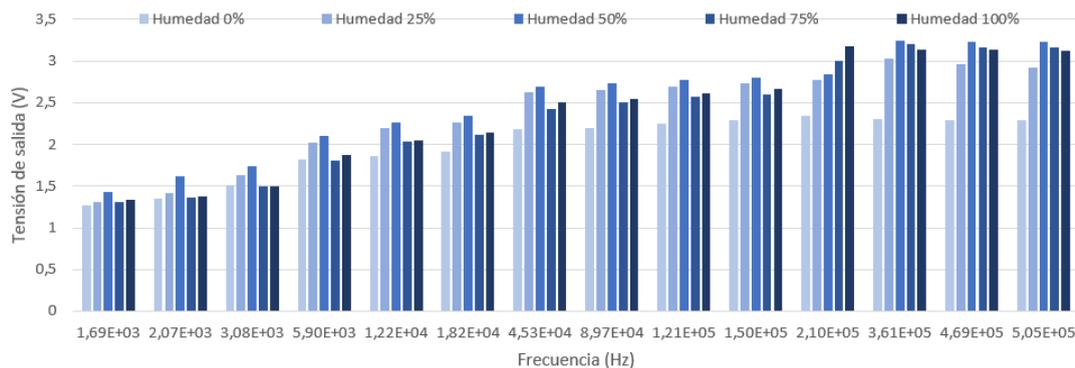


Figura 4.23: Experimentación con el Prototipo 4 (b)

#### 4.2.6. Conclusiones obtenidas a partir de los resultados

Como se ha podido ver, pese a la dificultad y la limitación que presenta este circuito casero para estudiar el comportamiento en frecuencia de los sistemas de bobinas y encontrar con ello los picos de tensión en las frecuencias de resonancia buscadas frente a lo que sería realizarlo de la misma forma mediante instrumentación de laboratorio como podría ser con un generador de señales y un osciloscopio, se ha logrado obtener un modelo aparentemente adecuado para el sensor de humedad del suelo basado en bobinas. Tal y como se anunciaba anteriormente, para este proyecto prima más la linealidad de los valores de tensión en los distintos niveles de humedad sobre la frecuencia de resonancia, pues ésta se proponía como la opción óptima en el caso de existir varias frecuencias con dicho crecimiento o decrecimiento de la tensión de forma lineal. El motivo de esto es lograr una lectura con mayor precisión acerca del nivel de humedad. Con ello, únicamente el primer prototipo con relación 1:1 de 40 espiras ha presentado esta cualidad de forma diferenciada a una determinada frecuencia lejos de manifestarse como aquella de resonancia, además de ser el modelo más económico dada la sección de hilo conductor utilizada. Sin embargo, estos valores de tensión pueden ser suficientes para el propósito de este proyecto.

Es importante recalcar el comportamiento del agua sobre la tierra pues, según la composición de ambas, los resultados pueden variar de una forma u otra, desde el aumento de la tensión de salida con el nivel de humedad o su disminución. Como ya se ha mencionado, es totalmente necesaria la experimentación llevada a cabo para lograr un mejor rendimiento en función del terreno ya que cada tipo de tierra, tal y como se puede ver en el estudio realizado en la Universidad Politécnica de Valencia[37], se comporta de una manera distinta, pues en unos casos la tensión de salida tiende a aumentar según se va perdiendo la humedad mientras que en otros tiende a disminuir. De esta forma, todo el proceso de experimentación debe repetirse en cada entorno en el que se desee implementar este tipo de sensor y, en medida de lo posible, tratar de comparar distintos prototipos de bobinas ya que cada uno de ellos puede dar lugar a resultados diferentes en función de dicha composición, por lo que esto no implica que el modelo seleccionado pueda funcionar en cualquier tipo de terreno y a la frecuencia de la que se espera ese comportamiento más lineal en función del nivel de humedad. Además, la temperatura también influye según lo descrito en el libro *Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos*[38], pues empeora la conductividad del hilo de cobre que conforma la bobina, lo que también afecta a las inductancias de las bobinas y a su factor de calidad Q. Estas pruebas se han realizado con antelación a su defensa en el mes de julio a través de un sistema ideado con los conocimientos adquiridos sobre electrónica en esta etapa universitaria por lo que, al carecer de instrumentación para la producción de estas señales y la medición de los resultados, los valores de salida del circuito son un tanto inexactos y bajos dado que la pila de 9V solo permite generar corrientes de hasta 300mA, lo que junto al resto de componentes pasivos hace que disminuya. Adicionalmente, teniendo en cuenta la duración de esta fase de experimentación y el desgaste de las pilas, se han ido sustituyendo periódicamente para evitar que esto influya en los resultados. Sin embargo, ante tal cantidad de variables que afectan en este proyecto, se ha sido autosuficiente para lograr probar los diferentes prototipos de bobinas y decantarse por una mejor opción, lo cual podría llegar a valorarse mejor posteriormente en laboratorio.

Una vez logrado este objetivo, ya se puede comenzar a materializar el sensor de humedad del suelo basado en bobinas defendido a lo largo de este proyecto. Para ello, primero se debe comprobar su funcionamiento con el circuito de alimentación diseñado.

#### 4.2.7. Integración del sensor en el circuito de alimentación

Una vez se ha seleccionado el modelo de bobinas a utilizar como sensor de humedad del suelo y conocida la frecuencia para la que se garantiza la mayor linealidad posible del sistema para diferentes niveles de humedad, se puede pasar a conformar el circuito de alimentación de forma que se adapte a la inductancia de la bobina primaria por medio de las ondas sinusoidales de corriente anteriormente vistas. Para ello, se debe ajustar la capacidad de C1 a los 210kHz, la cual se logra con un valor de 270pF. Para probar dicha resonancia se han ido sustituyendo las capacidades que forman C2 para dar con aquella combinación que ofrezca mayor tensión de salida, aproximándose así a la capacidad con la que se consigue la resonancia del circuito. Dado que tan solo se cuenta con un limitado surtido de condensadores, esta resonancia no será la ideal vista en la Figura 4.5 y la señal no será exactamente una senoide. El resultado es el mostrado en la Tabla 4.5. Esta capacidad para la resonancia del circuito de alimentación se ha comprobado para el mayor nivel de humedad, el del 100 %, ya que será aquél que rinda el valor máximo de voltaje y evitará que valores medios de humedad adquieran mayor tensión de salida que la máxima y, por tanto, dejando de ser creciente.

| C2     | $V_{out}$ |
|--------|-----------|
| 40.9nF | 2.76V     |
| 30.9nF | 2.83V     |
| 20.4nF | 2.98V     |
| 10.2nF | 2.68V     |
| 5.1nF  | 2.59V     |
| 3.46nF | 2.46V     |
| 2.57nF | 2.27V     |

Tabla 4.5: Capacidad para la resonancia del circuito de alimentación

Analizando esto, el pico se obtiene con una capacidad de 20.4nF, para la cual se logra una tensión máxima de 2.98V, superior a la obtenida en la experimentación con dicho prototipo. Ahora, una vez hecho esto, ya se puede pasar a probar el sensor final a diferentes niveles de humedad, tomando así los valores mínimo y máximo como referencia para la posterior programación del dispositivo final basado en LoRa. Sin embargo, antes de realizar este prototipo final de mota sensora, conviene tratar más detenidamente las características y limitaciones de los módulos ESP32 a la hora de leer los datos del sensor, pues es posible que dicho módulo no sea capaz de realizar la lectura de valores de tensión por encima o por debajo de los umbrales para los que se delimita. Se aprovechará también para elaborar la parte telemática de este proyecto mediante la red LoRaWAN, anteriormente valorada en una comparativa con otras tecnologías *IoT* y encargada de transmitir y procesar los datos de modo que se pueda consultar el estado de la humedad del suelo en cada punto del terreno de cultivo en tiempo real desde una aplicación.

### 4.3. Implementación de la red LoRaWAN

Para la implementación de la red LoRaWAN se utilizarán dos módulos ESP32 LoRa v1 de TTGO, uno de ellos actuando como *gateway* y el otro como dispositivo final para transmitir los datos recogidos del sensor de humedad del suelo basado en bobinas que se ha diseñado en este proyecto. Asimismo, el *gateway* se conectará través de la red WiFi con el servidor de red, que a su vez cederá los datos ya filtrados al servidor de la aplicación responsable del dispositivo final. Esta arquitectura propia de LoRaServer en su conjunto estará alojada en una Raspberry Pi 3B+. Adicionalmente, se configurará una base de datos con InfluxDB a través de su integración y se realizará lectura y representación gráfica de los mismos mediante Grafana.

#### 4.3.1. Primera toma de contacto con módulos ESP32 LoRa

Antes de comenzar con la implementación de una red LoRaWAN más compleja, conviene habituarse previamente con la programación del par de módulos ESP32 LoRa de TTGO que se pretenden utilizar. Con tal motivo, se ha decidido realizar una primera prueba de la comunicación directa más simple entre ambos dispositivos, con un emisor que enviará una variable relacionada con el entorno en el que se enmarca el proyecto, que es «*humidity*»; y otro receptor que, tras su recepción, lo mostrará por la pantalla OLED con la que cuenta para confirmar que la transmisión se ha realizado con éxito. Para ello, se ha desarrollado el código necesario para ambos nodos a través de sus ejemplos que se pueden encontrar en su librería y se ha añadido la configuración del *display* OLED que permite visualizar el proceso mediante la librería SSD1306. También se ha establecido la banda de 868MHz e inicializado los pines reservados al módem LoRa SX1276 mostrados en la Tabla 4.6.

| Uso LoRa | Pin |
|----------|-----|
| SCK      | 5   |
| MISO     | 19  |
| MOSI     | 27  |
| SS       | 18  |
| RST      | 14  |
| DI0      | 26  |

Tabla 4.6: Pines del ESP32 reservados al controlador SX1276 de LoRa

Para la lectura de los datos de la humedad se debe averiguar qué pines son aquellos capaces de convertir el valor de una señal analógica como será la tensión de salida de la bobina secundaria en una señal digital que pueda ser procesada. Basta con mirar la Figura 3.4 para conocer aquellos marcados con la etiqueta *ADC* de *Analog to Digital Converter* y que no están reservados para la pantalla OLED ni al módem de LoRa, como pueden ser los pines 34 o 35, entre otros muchos. También será necesario adaptar los voltajes de entrada del circuito de inducción entre bobinas con el fin de establecerlo dentro de los márgenes aceptables por el módulo para su lectura, pues tensiones por encima de éstos pueden dañar el circuito interno del dispositivo mientras que tensiones por debajo del rango pueden no llegar a ser detectadas. También se deberá tener en cuenta el rango de tensiones de entrada para reducir el consumo de potencia en el circuito de alimentación de las bobinas y evitando por tanto el uso de divisores de tensión como método para escalarlo.

Para probarlo, se ha utilizado un potenciómetro en un divisor de tensión conectado a una pila para regular su salida hacia uno de estos pines ADC (Figura 4.24), emulando así diferentes posibles valores de tensión de salida y, por tanto, diferentes valores de humedad del suelo simplemente con la rotación del regulador de este potenciómetro. Estos pines ADC usan entre 6 y 12 bits para representar los valores analógicos, por lo que permite valorar hasta 4095 niveles más el cero. Cuanto mayor sea el número de bits mayor será la resolución y, por tanto, más se asemejará un valor a la realidad. Este valor digital se transformará a un valor porcentual para luego transmitirlo al servidor de aplicación y así sea posible conocer el valor del nivel de humedad del suelo. Para su comprobación, también se actualiza el valor que aparece en el *display* tras la transmisión/recepción del dato.

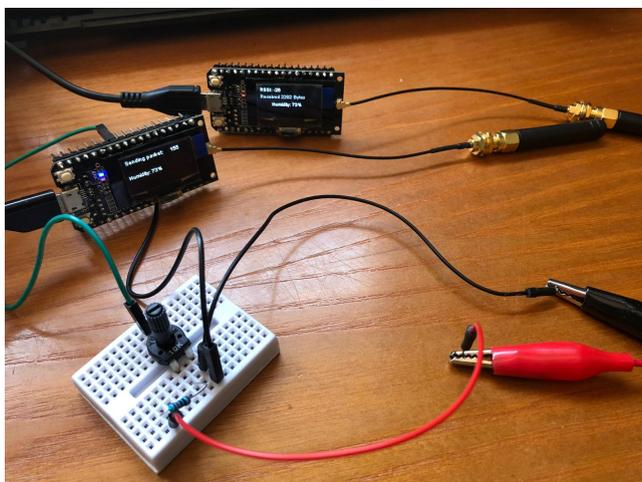


Figura 4.24: Montaje de los nodos ESP32 LoRa con entrada ADC

Es lógico pensar que, dado que se busca la linealidad del voltaje inducido con respecto al nivel de humedad, también se trate de lograr lo mismo en las mediciones de las mismas por parte del módulo de lectura. Sin embargo, en el caso del ESP32, existen ciertas no-linealidades en su comportamiento al medir las tensiones reales analógicas del voltaje de salida del sensor con respecto a aquellas digitalizadas asignadas a dichos valores en forma de niveles de tensión, como se ve a continuación en la Figura 4.25.



Figura 4.25: Voltaje (analógico) vs. lectura ADC (nivel digital) experimental

Como se puede apreciar, existe cierto error tanto al comienzo como al final del intervalo, aproximando a los valores límite (0 y 4095) aquellos inferiores a los 0V y superiores a los 3.3V, tensión en la que la función alcanza su saturación y cualquier valor superior a éste se corresponde con el nivel 4095. Adicionalmente, existe una zona más lineal entre los 0.1V y los 2.7V, aproximadamente, mientras que a partir de dicho voltaje comienza un crecimiento no lineal algo más rápido hasta llegar a los 3.2V. También se puede ver la evolución de estos datos en términos porcentuales de la humedad (Figura 4.26). Cuanto mayor sea el valor de tensión de salida, menor será la humedad del suelo.

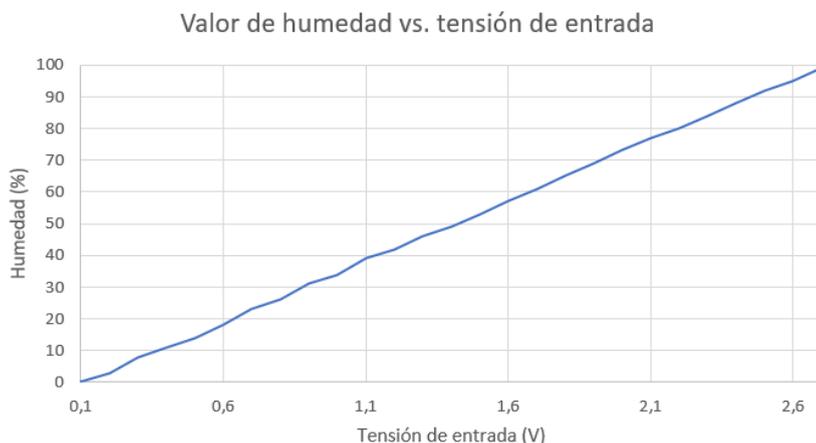


Figura 4.26: Humedad porcentual experimental con *map()*

Por ello, se tratará de llevar los niveles de tensión de salida a valores no superiores a los 2.7V, el cual se corresponderá con el valor de tierra totalmente húmeda o la Capacidad de Campo (100 %); ni tampoco inferiores a los 0.1V, que se corresponderá con el de la tierra seca o el Punto de Marchitamiento (0 %), como se muestra en la Figura 4.26. Para ello se podrá aumentar o reducir el voltaje de alimentación del circuito primario para establecer la máxima tensión inducida obtenida en 2.7V al medir sobre tierra seca. También será necesario establecer una nueva escala de humedad porcentual que se adapte a los valores correspondientes dentro del intervalo entre los 0.1V y los 2.7V, lo cual se puede solucionar fácilmente mediante las funciones *map()* y *constrain()* de la librería *Math.h*.

```
int prime = analogRead(pinHumidity);
int prime2 = map(prime, -16, 3360, 0, 100); // -16 -> 0.1V , 3360 -> 2.8V
int humidity = constrain(prime2, 0, 100);
```

En cualquier caso, tal y como se vio en los apartados 2.1 y 2.3.4, será necesaria una calibración previa en función de la tipología y la composición del suelo así como la del agua utilizada para el riego de la misma forma en la que se ha realizado la experimentación con bobinas en este proyecto. Por tanto, se tendrá que volver a realizar el mismo proceso para evitar que la tensión máxima inducida quede fuera de dicho intervalo, ya sea cambiando de prototipo, elevando o reduciendo el voltaje de la pila, acercando o distanciando las bobinas, etc. Dado que con este código la salida marca el 100 % de humedad a partir de los 2.7V, se puede utilizar como guía a la hora de calibrar el distanciamiento entre las bobinas que conforman el sensor. Por ejemplo, si la salida es del 100 % de humedad cuando gravimétricamente es del 50 %, se debería reducir el voltaje de alimentación hasta lograr dicho valor. Este aspecto se tratará de nuevo con mayor profundidad más adelante durante el montaje final del sistema.

### 4.3.2. Montaje de los servidores LoRaServer

Durante la implementación de la red LoRaWAN se ha trabajado con una versión anterior al cambio de nombre a ChirpStack, producido después de su incorporación al proyecto.

Para crear el servidor de red es importante que se establezca una dirección IP estática a fin de evitar tener que modificar el código en el resto de elementos de la red en los que se apunta a la dirección del servidor cada vez que el servidor DHCP del módem WiFi le asigne otra IP, como es el *gateway* que se pretende implementar. Esto se puede lograr rápidamente en Raspbian añadiendo las siguientes líneas al fichero `/etc/dhcpd.conf` y reiniciando el sistema. En este caso se le asigna la dirección local privada 192.168.1.132/24.

```

1  # interface wlan0
2  # static ip_address=192.168.1.132/24
3  # static routers=192.168.1.1
4  # static domain_name_servers=192.168.1.1

```

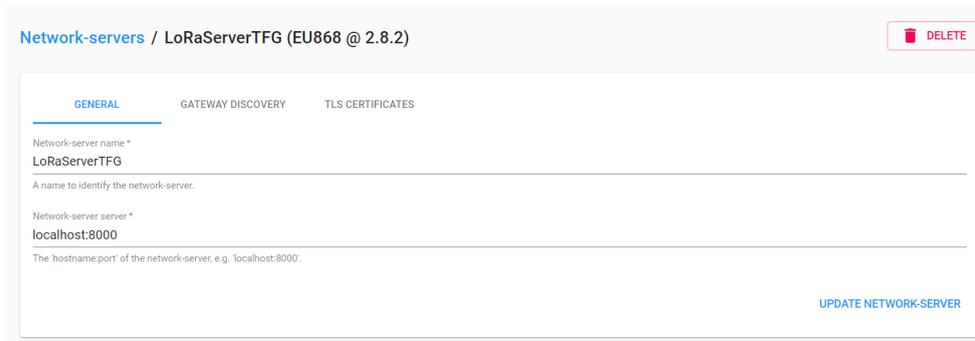
Para continuar con la instalación de los servicios, se ha seguido la guía de configuración de LoRaServer[39] del ingeniero holandés Robert Lie. En ella se detallan los comandos y la configuración necesaria para poner en funcionamiento sus componentes LoRa Gateway Bridge, LoRa Server, LoRa App Server y la base de datos de PostgreSQL junto con el motor Redis que utilizan estas dos últimas para la aplicación de las configuraciones del sistema. Nótese que esta guía se realiza para entornos basados en Debian, como es el caso de Raspbian, por lo que de utilizar cualquier otra distribución se requiere de comandos alternativos. También es importante tener en cuenta el uso de puertos para la comunicación entre elementos de la red, como se puede ver de forma resumida en la Tabla 4.7.

| Puerto | Comunicación  |
|--------|---|
| 1700   | Gateways - LoRa Gateway Bridge (UDP)                |
| 1883   | LoRa Gateway Bridge - MQTT broker - LoRa Server     |
| 8001   | LoRa Server - Internal API Server - LoRa App Server |
| 8080   | Cliente web - RESTful API (HTTP)                    |

Tabla 4.7: Listado de puertos utilizados en LoRaServer

Una vez se ha configurado y verificado el correcto funcionamiento de todos y cada uno de los elementos de la arquitectura LoRaServer, se pasa ahora a la configuración a través de la interfaz web de los perfiles, de la aplicación y de los nodos, tanto del *gateway* monocanal como del nodo final. Para ello se ha continuado siguiendo la guía anterior, aunque esta vez se matiza con la adaptación de los elementos conforme las necesidades del proyecto. Entre las tareas realizadas se encuentran:

- Primero, se ha definido un único servidor de red llamado «LoRaServerTFG». La gestión de éste es accesible a través del puerto 8000 y la misma IP del servidor con *localhost* (192.168.1.132:8000). El servidor cuenta con su propia base de datos PostgreSQL para almacenar datos sobre las configuraciones realizadas a través de esta misma interfaz web (Figura 4.27). No se ha implementado ningún tipo de cifrado SSL/TLS para simplificar la demostración en la comunicación con el servidor a través del navegador utilizado para tal fin. Sin embargo, su configuración es totalmente recomendable en el caso de que se desee implementar dicha red con una perspectiva más profesional.



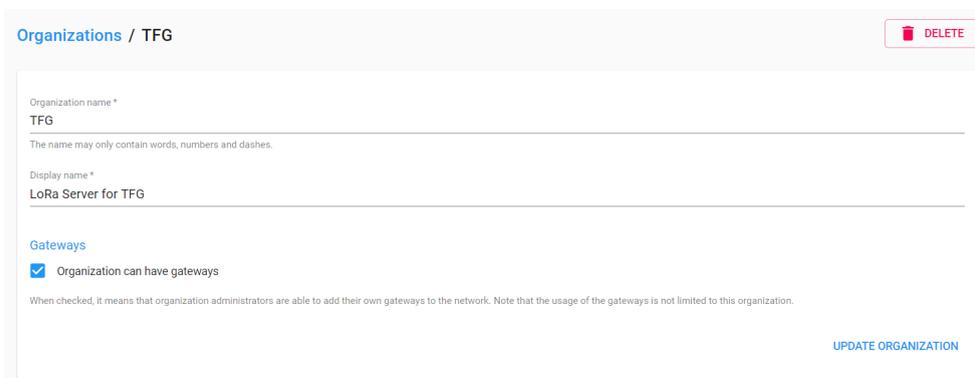
The screenshot shows the configuration page for a network server in the LoRaServer interface. The page title is "Network-servers / LoRaServerTFG (EU868 @ 2.8.2)". There are three tabs: "GENERAL", "GATEWAY DISCOVERY", and "TLS CERTIFICATES". The "GENERAL" tab is active. The form contains the following fields:

- Network-server name \***: LoRaServerTFG
- Network-server server \***: localhost:8000

There are two buttons: "DELETE" (red) and "UPDATE NETWORK-SERVER" (blue).

Figura 4.27: Configuración del servidor de red de LoRaServer

- Luego, se ha definido un perfil para una organización a la que se le ha permitido el uso de *gateways* dentro de la red. En este caso, como se puede apreciar en la Figura 4.28, al no tratarse de ninguna compañía real, se le ha llamado «TFG».



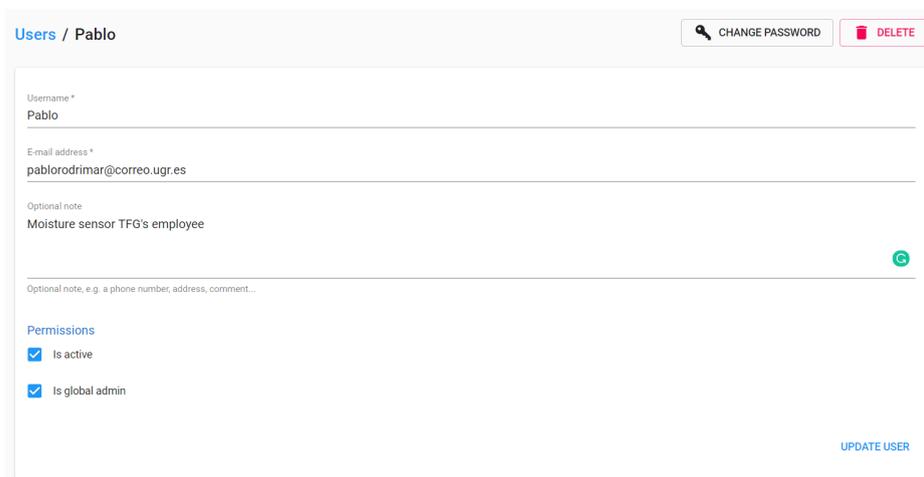
The screenshot shows the configuration page for an organization in the LoRaServer interface. The page title is "Organizations / TFG". There are two buttons: "DELETE" (red) and "UPDATE ORGANIZATION" (blue). The form contains the following fields:

- Organization name \***: TFG
- Display name \***: LoRa Server for TFG

There is a section for "Gateways" with a checked checkbox: "Organization can have gateways". Below this, there is a note: "When checked, it means that organization administrators are able to add their own gateways to the network. Note that the usage of the gateways is not limited to this organization."

Figura 4.28: Configuración de la organización

- Con ello, se ha creado un perfil de empleado de la compañía «TFG». A través de éste (Figura 4.29), el usuario puede administrar la red LoRaWAN.



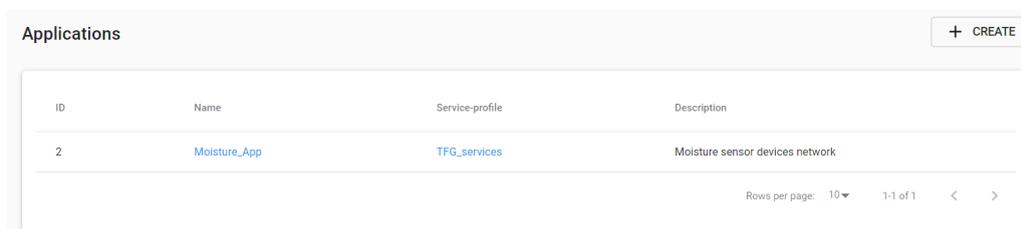
The screenshot shows the configuration page for a user profile in the LoRaServer interface. The page title is "Users / Pablo". There are two buttons: "CHANGE PASSWORD" (blue) and "DELETE" (red). The form contains the following fields:

- Username \***: Pablo
- Email address \***: pablordrimar@correo.ugr.es
- Optional note**: Moisture sensor TFG's employee

There is a section for "Permissions" with two checked checkboxes: "Is active" and "Is global admin". There is also a "COPY" button (green) and an "UPDATE USER" button (blue).

Figura 4.29: Configuración del perfil de un empleado

- También se ha definido un perfil de servicios para permitir, además de los datos propios de la aplicación, el envío de meta-datos como el RSSI, el SNR, la banda y el SF utilizados, etc. Este perfil se ha llamado «TFG\_services». A partir de éste, se ha creado una aplicación llamada «Moisture\_App» para los dispositivos de la red encargados de medir la humedad del suelo (Figura 4.30). Pueden existir múltiples perfiles de servicios y aplicaciones para un mismo servidor de red pero, dado que este proyecto se centra únicamente en la medición de la humedad del suelo de un cultivo y la temperatura del entorno, se han definido únicamente éstos para ello.

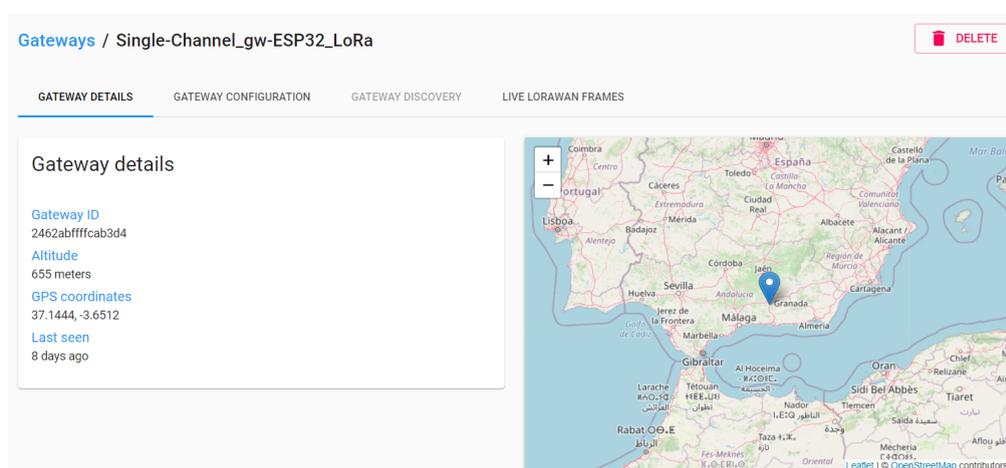


| ID | Name         | Service-profile | Description                     |
|----|--------------|-----------------|---------------------------------|
| 2  | Moisture_App | TFG_services    | Moisture sensor devices network |

Rows per page: 10 1-1 of 1

Figura 4.30: Configuración de la aplicación de humedad del suelo

- Después, se ha creado un *gateway* ligado al servidor para la recolección de los datos de la red LoRaWAN. Este *gateway* se ha llamado «Single-Channel\_gw-ESP32\_LoRa», el cual será uno de los ESP32 LoRa utilizados en este proyecto como *gateway* mono-canal. Se ha definido su ID y su localización geográfica exacta para tratar cualquier tipo de estadística o problema asociados a éste (Figura 4.31). Pueden existir varios trabajando al mismo tiempo y retransmitiendo la información al servidor, aunque éste marcará en la trama en formato JSON cuál ha sido el *gateway* que lo ha enviado.



Gateways / Single-Channel\_gw-ESP32\_LoRa

DELETED

GATEWAY DETAILS GATEWAY CONFIGURATION GATEWAY DISCOVERY LIVE LORAWAN FRAMES

Gateway details

Gateway ID  
2462abffffcab3d4

Altitude  
655 meters

GPS coordinates  
37.1444, -3.6512

Last seen  
8 days ago

Figura 4.31: Configuración del gateway mono-canal

- Por último, se ha definido un perfil de dispositivos dentro de la clase A para lograr un menor consumo de energía. Además, se ha configurado el método de activación a ABP para mayor simplicidad. Este perfil se ha llamado «Moisture\_sensor\_devices». A partir de ello y del perfil de aplicación anteriormente configurado se ha creado un dispositivo llamado «Moisture\_sensor\_ABP», que será el otro ESP32 LoRa utilizado como nodo final para recolectar los datos del sensor de humedad del suelo basado en bobinas y del sensor de temperatura. Con esto, se han generado un DevEUI que identifica

el dispositivo y un par de claves: la NwkSKey para garantizar la integridad de los mensajes enviados por el nodo final al servidor de red; y la AppSKey para encriptar el contenido de los datos entre el propio dispositivo final y el servidor de aplicación. Se ha deshabilitado la validación del contador de tramas transmitidas/recibidas ya que, aunque permita una mayor seguridad, puede acarrear problemas al perder la conexión o reiniciar el dispositivo. Esta configuración se puede ver en la Figura 4.32.

Figura 4.32: Configuración del dispositivo final

Una vez completada la implementación de los diferentes elementos que componen la arquitectura LoRaServer vista en la Figura 3.11 y la configuración de los perfiles, se procede ahora al montaje del *gateway* monocanal mediante uno de los módulos ESP32 LoRa. Para ello es importante comentar brevemente ciertas nociones básicas acerca de la interfaz de programación de Arduino IDE.

### 4.3.3. Configuraciones previas en Arduino IDE

Para este proyecto, dado que se están utilizando dos módulos ESP32 LoRa programables y compatibles con Arduino IDE, es importante que se utilice un gestor de tarjetas adicionales en las preferencias del programa para poder agregar placas de otros fabricantes que no son propiedad de Arduino. En concreto, la que interesa es la llamada «TTGO LoRa32-OLED v1» del paquete de Espressif[40]. Además, se debe instalar el *driver* del puerto serie CP2102 que permitirán la comunicación entre el módulo ESP32 con el ordenador donde se pretende compilar el código.

Este procedimiento se ha realizado con anterioridad a los ensayos ya desarrollados para probar la comunicación entre ambos nodos mediante la tecnología de comunicación inalámbrica propuesta para este proyecto y de la lectura de datos a través de sus pines ADC, donde se han utilizado librerías como «LoRa», para las comunicaciones entre módulos; «SSD1306», para el control de la pantalla OLED de la que disponen; o «SPI», para las comunicaciones síncronas con el módem SX1276.

Desde este momento, dado que se trata ahora de desarrollar elementos mucho más complejos a los probados anteriormente, se recurre a otras librerías más elaboradas que han sido creadas específicamente para tal fin.

#### 4.3.4. Configuración del gateway monocanal

Una vez se ha probado el funcionamiento en la lectura de datos a través de los pines ADC de los módulos ESP32 LoRa y la comunicación LoRaWAN entre ellos; y configurado los servidores de red y aplicación enmarcados dentro de la arquitectura de LoRaServer, es momento de comenzar a usar las funciones con las que se logra la transmisión y recepción de los datos para implementar un *gateway* monocanal que reciba los datos de lectura de la humedad del suelo y de la temperatura de cualquier nodo final ubicado en una determinada ubicación sobre el terreno de cultivo. Para intentar que este *gateway* monocanal se asemeje de la mejor forma a uno más comercial con el que se podría trabajar cotidianamente en proyectos de tal envergadura, se utilizará el repositorio en GitHub de Jac Kersing[41] con el código necesario para formar uno mediante módulos ESP32. Este repositorio está basado en una versión anterior creada por Marteen Westenberg para los módulos ESP8266. Su contenido se resume a un conjunto de ficheros con el código necesario junto con archivos de configuración y librerías adicionales necesarias para su ejecución (uso de WiFi, servidor web, codificadores de formato JSON y Base64, cifrado AES, etc). El código no es necesario editarlo mas que para cualquier personalización de las funcionalidades tales como el canal al que opera el *gateway* o los datos dispuestos por pantalla; pero sí su configuración para adaptarlo a las necesidades de este proyecto.

Observando el código con mayor detenimiento se ha podido conocer cuáles son los parámetros a tener en cuenta durante la configuración del *gateway*. Estos parámetros son editables a través del fichero de configuración «ESP-sc-gway.h» o a través del servidor web al que se puede acceder a través de su dirección IP. Entre ellos están:

- **Channel Activity Detection (CAD).** Se ha activado para posibilitar que múltiples nodos finales utilicen *Spreading Factors* diferentes para comunicarse con el *gateway*. Por tanto, si se modifica el *Spreading Factor* en el nodo final en el que se centra el proyecto, el *gateway* seguirá recibiendo sus transmisiones gracias a la ortogonalidad de éstos. En el caso en que se añadan más nodos se deben programar marcos temporales en los dispositivos finales para evitar colisiones entre las tramas de los distintos nodos.

```
o #define _CAD 1
```

- **Spreading Factor.** Se ha marcado por defecto a 7 para reducir el tiempo de transmisión y el consumo de energía de los nodos finales. De inhabilitarse el CAD a través de la interfaz web este valor será el utilizado.

```
o #define _SPREADING SF7
```

- **Número de canales.** Dado que se trata de un ESP32 LoRa con un único canal de escucha simultánea, se marcará la opción de utilizar estrictamente un único canal para evitar que el *gateway* cambie de canal ya que en realidad éste es capaz de comunicarse a través de otras bandas de frecuencia, al menos en los canales de 867.1MHz, 868.1MHz, 868.3MHz y 868.5MHz. Por defecto, este canal está configurado para la banda de 868.1MHz, la cual se utiliza para la demostración.

```
o #define _STRICT_1CH 1
```

- **Comunicación con el servidor.** Para comunicarse con el servidor de red se ha utilizado la dirección IP de la Raspberry Pi 3B+ y el puerto 1700, que es el que utiliza LoRaServer para las comunicaciones UDP con los *gateways*. El código está desarrollado para el uso de *The Things Network*, pero es compatible con LoRaServer.

```
0 #define _TTNPORT 1700
1 #define _TTNSERVER "192.168.1.132"
```

- **Acceso a la red WiFi.** Se ha configurado el SSID y clave WPA de conexión con el punto de acceso WiFi, a través del cual se comunicará con el servidor de red mediante el protocolo UDP/IP para enviarle los datos recogidos.

```
0 wpas wpa[] = {
1     { "", "" },
2     { "<SSID>" , "<PSSWD>" }
3 };
```

- **Pantalla OLED.** Puesto que este módulo cuenta con una pantalla OLED, se puede habilitar para ver meta-datos del último mensaje enviado al servidor tales como el RSSI, el *Spreading Factor*, el tamaño del paquete o la ID del nodo final.

```
0 #define OLED 1
```

- **Datos sobre el gateway.** También se han añadido otros datos como la ubicación geográfica del *gateway* así como la hora local actualizada por un servidor NTP y su descripción. Esta ubicación será la misma que aparece en la configuración del *gateway* (Figura 4.31).

```
0 #define NTP_TIMESERVER "es.pool.ntp.org"
1 #define NTP_TIMEZONES 2
```

- **Mapeado de pines.** Se ha configurado la tercera opción del fichero «loraModem.h» para placas ESP32 LoRa. En este fichero se encuentran todos los aspectos relacionados con el módem de LoRa tales como el tipo de módulo utilizado como *gateway*, el rango de frecuencias para la región (en este caso es Europa), los meta-datos de las comunicaciones, etc.

```
0 #define _PIN_OUT 3
```

- **Gateway ID.** Para la identidad del *gateway* se ha modificado el código que venía por defecto en el fichero «Esp-sc-gway», donde se utilizaba una ID creada a partir de la dirección MAC que el router le asignaba de forma automática para utilizar una única ID fija creada anteriormente de forma manual en el servidor de red. Esto evitará que el *gateway* cambie su ID durante la demostración.

Ahora el *gateway* monocanal ya está listo para recoger los datos transmitidos por las motas sensoras repartidas a lo largo del terreno de cultivo y reenviarlas al servidor de red de LoRaServer. Antes de poder probar la red es necesario crear un nodo final de prueba con el que recoger los datos a través de un pin ADC y transmitirlos al *gateway*.

### 4.3.5. Configuración de la mota sensora

En la configuración de la mota sensora se ha utilizado el repositorio «LMIC»[42] (*LoraMAC-In-C*), creado por la compañía IBM. Este conjunto de librerías permite la programación de los módems de LoRa a través de numerosas funciones como la configuración de las claves, el canal y el *SF* utilizados, el tamaño de las tramas, etc. En este proyecto se utiliza una versión adaptada a placas compatibles con Arduino. Para comenzar a trabajar con ella basta con incluirla como librería como formato ZIP desde la interfaz de programación Arduino. Sin embargo, antes de ponerse manos a la obra con el código se ha tenido que editar el fichero «hal.cpp» para adaptar los pines SPI a los del ESP32 LoRa mediante la función *SPI.begin(SCK, MISO, MOSI, SS)*, tal y como se puede ver en la Tabla 4.8.

| Uso SPI | Pin |
|---------|-----|
| SCK     | 5   |
| MISO    | 19  |
| MOSI    | 27  |
| SS      | 18  |

Tabla 4.8: Pines SPI del ESP32 utilizados en la librería LMIC

Para el desarrollo del código se ha partido desde el ejemplo existente en este repositorio. Puesto que se ha configurado un dispositivo en LoRaServer mediante ABP, es necesario identificar el dispositivo con el DevEUI, el NwksKEY y el AppSKEY generados anteriormente en LoRaServer. Adicionalmente, se ha establecido un DevAddr para reconocer desde qué dispositivo el *gateway* ha recibido el mensaje. Nótese por tanto que el DevAddr debe ser único para la red, mientras que el DevEUI es único de forma global para cualquier red. Además, las claves de seguridad han de ser únicas en cada activación y sesión de los dispositivos de una misma red. También es necesario modificar otros aspectos como el mapeado de pines del módem de LoRa (Tabla 4.6) o deshabilitar el resto de canales dejando solamente el del *gateway* mediante la función *LMIC\_disableChannel()*, trabajando así únicamente con la banda de 868.1MHz. Asimismo, mediante la definición de una constante, se ha establecido el *Spreading Factor* a 7, aunque éste puede ser editado para comprobar la ortogonalidad comentada anteriormente con el CAD. Por último, a partir del uso de las funciones *map()* y *constrain()* que se han visto anteriormente, se ha desarrollado el código necesario para la lectura de los datos recogidos por los sensores, tanto de la humedad como de la temperatura. Esta tarea se realiza de forma periódica cada cierto tiempo para ahorrar en consumo y respetar la normativa. El código completo utilizado para la programación de la mota sensora puede verse en el repositorio «TFGcode»[43].

El formato utilizado para el *payload* de la trama con los datos enviados por el nodo final es en formato *byte*, por lo que, dado que cada valor entero está representado mediante 8 bits, son necesarios dos Bytes por cada uno de los valores, para transmitir los datos de humedad del suelo y de la temperatura se utiliza un total de 4 Bytes, lo que junto con el encabezado permite lograr la transmisión rápida de una única trama dentro de los límites establecidos. Esto se puede lograr mediante un vector *payload* en el que para cada dato se utilizan las funciones *highByte()* y *lowByte()*. En este caso, se han representado sus bits del más al menos significativo. Este formato requiere de un decodificador en el servidor de aplicación para extraer los datos (*Applications>Moisture\_App>Application configuration*). Éste se muestra a continuación:

```

0  function Decode(fPort, bytes) {
1      if(bytes.length == 1){
2          if(bytes[0] == 1){
3              return{'button': 'activated'}
4          }else{
5              return{'error': 'button action unknown'}
6          }
7      }else if(bytes.length == 4){
8          var humidity = (bytes[0]<<8) | bytes[1];
9          var temperature = (bytes[2]<<8) | bytes[3];
10         return{'humidity': humidity,'temperature': temperature}
11     }else{
12         return{'error': 'payload unknown'}
13     }
14 }

```

En este momento, el nodo final también está listo para recoger los datos del sensor de humedad y enviarlos al *gateway*. En la Figura 4.33 se puede ver el resultado de las primeras transmisiones del nodo final hacia el *gateway* tras comenzar a ser alimentado por una batería. Para completar la red LoRaWAN propuesta en este proyecto ya queda centrarse en implementar la aplicación con la que poder visualizar dichos que se pretenden monitorizar.

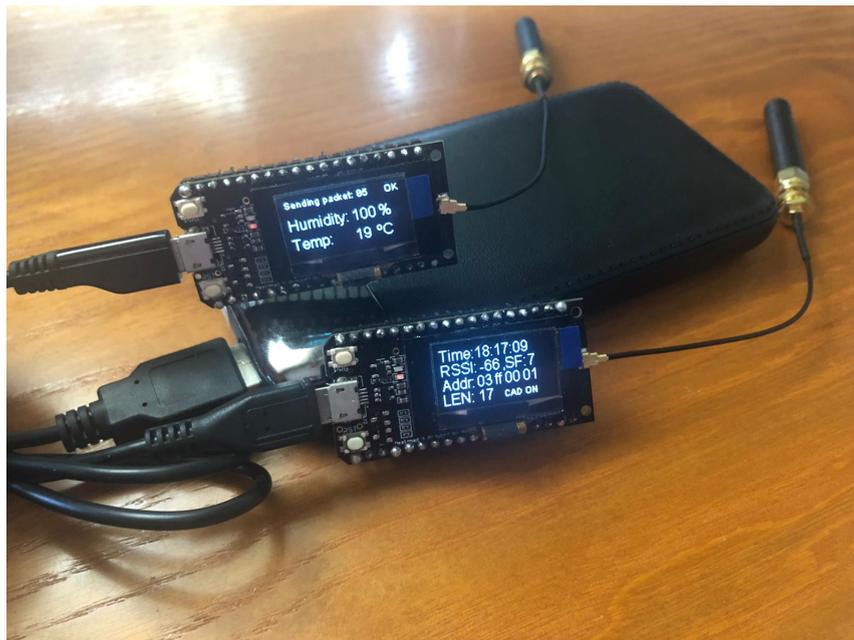


Figura 4.33: Prueba de la comunicación entre nodo final (arriba) y gateway (abajo)

#### 4.3.6. Aplicación integrada con InfluxDB y Grafana

Con el decodificador anterior es posible clasificar los datos de los sensores dentro de un objeto con dos parámetros: la humedad del suelo y la temperatura. LoRaServer cuenta con una integración con InfluxDB[44] que permite indexar los datos de dicho objeto en una base de datos para posteriormente ser extraídos por una aplicación que los procese y lleve

a cabo una respuesta en base a ellos. Este almacenamiento se realiza mediante un sello temporal, lo que permite ordenar los valores obtenidos a lo largo del tiempo. Para ello se debe instalar el servicio de InfluxDB en la Raspberry 3B+, por lo que son necesarios los siguientes comandos:

```
0 # wget -qO- https://repos.influxdata.com/influxdb.key | sudo apt-↵
    ↵ key add -
1 # echo "deb https://repos.influxdata.com/debian buster stable" | ↵
    ↵ sudo tee /etc/apt/sources.list.d/influxdb.list
2 # sudo apt update
3 # sudo apt install influxdb
```

Una vez instalado, es importante editar la configuración de autenticación para el acceso a las bases de datos pues, por defecto, no se requiere de ninguna credencial. Esto puede comprometer las políticas de integridad y confidencialidad de la organización encargada del control de la humedad del suelo. Por ello, se debe modificar la siguiente línea del fichero `/etc/influxdb/influxdb.conf`:

```
0 # auth-enabled = true
```

Ahora ya se puede iniciar el servicio para comenzar a trabajar con él.

```
0 # sudo systemctl unmask influxdb
1 # sudo systemctl enable influxdb
2 # sudo systemctl start
```

Una vez iniciado, se puede empezar por crear una base de datos propia que almacene los datos sobre la humedad de la tierra y la temperatura:

```
0 # influx
1 # CREATE DATABASE MoistureProject
2 # USE MoistureProject
3 # CREATE USER "Pablo" WITH PASSWORD 'TFGAdmin' WITH ALL PRIVILEGES
4 # GRANT ALL ON "MoistureProject" FROM "Pablo"
```

Con esto, se ha configurado la base de datos llamada «MoistureProject» para que se comunique a través del puerto 8086, el cual se establece por defecto para escuchar peticiones de acceso a la información contenida en éste. Se ha vinculado un nuevo usuario, «Pablo», con todos los privilegios sobre la base de datos por el que poder acceder a la información contenida en ésta. De la misma forma se podrían haber creado diferentes usuarios, uno con permisos de escritura desde LoRaServer y otro con permisos de lectura desde Grafana. También es posible utilizar una política de retención por la que establecer un ciclo de vida de los datos, borrándose de forma automatizada de la base de datos una vez transcurrido un determinado tiempo (semanas, meses, años, etc). Sin embargo, dado que se pretende guardar un historial solo para la demostración, no se implementará ninguna política de ciclo de vida de los datos. Ahora es necesario que se configure la integración con InfluxDB con las mismas credenciales desde LoRaServer (Figura 4.34).

Applications / Moisture\_App / Integrations / influxdb DELETE

InfluxDB integration configuration

API endpoint (write) \*  
http://192.168.1.132:8086/write

Username  
Pablo

Password  
.....

Database name \*  
MoistureProject

Retention policy name  
Sets the target retention policy for the write. InfluxDB writes to the DEFAULT retention policy if you do not specify a retention policy.

Timestamp precision \*  
Second

It is recommended to use the least precise precision possible as this can result in significant improvements in compression.

UPDATE INTEGRATION

Figura 4.34: Configuración de la integración con InfluxDB

Ahora, mediante esta integración, LoRaServer ya puede escribir sobre la base de datos de «MoistureProject» la información referida a la humedad del suelo y a la temperatura del espacio de cultivo. Para poder acceder a dicha información son necesarias las mismas credenciales con las que LoRaServer la indexa pues en este caso, como se ha mencionado, se ha utilizado un mismo usuario tanto para la escritura como para la lectura de los datos para mayor simplicidad.

Para comprobar que LoRaServer realmente está indexando la información sobre el estado de la humedad del suelo y de la temperatura, se puede acceder a la base de datos a través del terminal de Raspbian y ejecutar las siguientes líneas de la Figura 4.35:

```
root@raspberrypi:/# influx -username Pablo -password TFGAdmin
Connected to http://localhost:8086 version 1.8.0
InfluxDB shell version: 1.8.0
> USE MoistureProject
Using database MoistureProject
> show measurements
name: measurements
name
----
device_frmpayload_data_humidity
device_frmpayload_data_temperature
device_uplink
> SELECT * FROM device_frmpayload_data_humidity
```

Figura 4.35: Comprobación del funcionamiento de LoRaServer con InfluxDB

Como se puede observar, existe tres elementos dentro de la base de datos: información sobre la humedad del suelo, sobre la temperatura del ambiente y sobre la transmisión recibida. Si se ejecuta el SELECT de la última línea se puede acceder a cualquiera de ellos con los últimos valores registrados, como es el caso de la humedad, así diferenciándose sus campos con un sello temporal del dato, el nombre de la aplicación, la ID y el nombre del dispositivo y el valor de humedad registrado; tal y como se ve en la Figura 4.36.

| time                | application_name | dev_eui          | device_name         | f_port | value |
|---------------------|------------------|------------------|---------------------|--------|-------|
| 1591455901000000000 | Moisture_App     | a572a350499f578c | Moisture_sensor_ABP | 1      | 100   |
| 1591456082000000000 | Moisture_App     | a572a350499f578c | Moisture_sensor_ABP | 1      | 100   |
| 1591456263000000000 | Moisture_App     | a572a350499f578c | Moisture_sensor_ABP | 1      | 100   |
| 1591456445000000000 | Moisture_App     | a572a350499f578c | Moisture_sensor_ABP | 1      | 100   |

Figura 4.36: Verificación de los datos de la humedad en InfluxDB

Para la instalación ahora del servicio de Grafana[45] se utilizan los siguientes comandos:

```

0      # wget https://dl.grafana.com/oss/release/grafana-rpi_7.0.3↵
      ↵ _armhf.deb
1      # sudo dpkg -i grafana-rpi_7.0.3_armhf.deb
2      # sudo systemctl daemon-reload
3      # sudo systemctl enable grafana-server
4      # sudo systemctl start grafana-server

```

Este servicio es accesible a través de un navegador web con la dirección IP de la Raspberry 3B+ y el puerto 3000. Para ello es importante que se acceda a la misma dirección en la que se encuentra alojado el servidor de InfluxDB y utilice la misma base de datos anteriormente configurada, en este caso «MoistureProject». La clave de acceso al servidor InfluxDB es la misma que la que se ha configurado en LoRaServer al tratarse del mismo usuario. Una vez se ha accedido a la base de datos, ya se puede crear un *dashboard* con los gráficos que incluyen los valores de los diferentes campos que se han recibido de los nodos finales. Este *dashboard* es totalmente personalizable, tanto en aspecto como en los tipos de variables de los datos que se pretenden mostrar (porcentajes, temperaturas, etc). En este proyecto, para simplificar su funcionamiento en su demostración, se utilizan tan solo dos gráficas: una con la humedad porcentual y otra con la temperatura en grados Celsius. De crear nuevos parámetros dentro del objeto de la aplicación, se puede llegar a controlar el RSSI de cada nodo, el número de mensajes totales recibidos, etc. Además, es posible establecer alertas cuando la humedad es inferior a un determinado valor para el que el cultivo puede requerir de riego. Para este caso se ha utilizado un 20%.

Una vez finalizado el proceso, ya se puede poner a prueba el sistema y consultar la gráfica final con el estado de la humedad del suelo y de la temperatura de un punto del terreno de cultivo.

#### 4.3.7. Primeras pruebas de la red LoRaWAN

Para comenzar a probar la red LoRaWAN, se ha vuelto a utilizar el circuito con el potenciómetro para simular la variación de la humedad a lo largo del tiempo. Se ha configurado el intervalo de transmisión a 3 minutos, por lo que cada vez que transcurra dicho intervalo el nodo final transmitirá el valor de la humedad del suelo y de la temperatura medidos unos instantes antes de la transmisión, dando lugar así a un sistema de tiempo real flexible. Con el código y las configuraciones de los nodos y los servidores realizadas en los apartados anteriores, se pueden obtener ya resultados simplemente una vez se conecten los nodos y la Raspberry Pi 3B+ a un sistema de baterías y a la red eléctrica, respectivamente. Si se deja transcurrir un tiempo prudencial, se pueden observar las siguientes transmisiones de la Figura 4.37.

```

UPLINK          10:51:34 AM          UnconfirmedDataUp          03ff0001

▼ rxInfo: [] 1 item
  ▼ 0: {} 12 keys
    gatewayId: "2462abffffcab3d4"
    time: null
    timeSinceGpsEpoch: null
    timestamp: 1786786576
    rssi: -62
    loraSnr: 9
    channel: 0
    rfChain: 0
    board: 0
    antenna: 0
  ▼ location: {} 5 keys
    latitude: 37.1444
    longitude: -3.6512
    altitude: 655
    source: "UNKNOWN"
    accuracy: 0
    fineTimestampType: "NONE"
  ▼ txInfo: {} 3 keys
    frequency: 868099975
    modulation: "LORA"
  ▼ loRaModulationInfo: {} 4 keys
    bandwidth: 125
    spreadingFactor: 7
    codeRate: "4/5"
    polarizationInversion: false

▼ phyPayload: {} 3 keys
  ▼ mhdr: {} 2 keys
    mType: "UnconfirmedDataUp"
    major: "LoRaWANR1"
  ▼ macPayload: {} 3 keys
    ▼ fhdr: {} 4 keys
      devAddr: "03ff0001"
    ▼ fCtrl: {} 5 keys
      adr: true
      adrAckReq: true
      ack: false
      fPending: false
      classB: false
      fCnt: 8
    ▼ fOpts: [] 2 items
      ▼ 0: {} 2 keys
        cid: "RXParamSetupReq"
        ▼ payload: {} 3 keys
          channelAck: true
          rx2DataRateAck: true
          rx1DROffsetAck: false
      ▼ 1: {} 2 keys
        cid: "LinkADRReq"
        ▼ payload: {} 3 keys
          channelMaskAck: false
          dataRateAck: true
          powerAck: true
      fPort: 1
    ▼ frmPayload: [] 1 item
      ▼ 0: {} 1 key
        bytes: "yxEiHw=="
        mic: "d2e9a806"

```

Figura 4.37: Transmisiones recibidas por el servidor de red de LoRaServer

En la anterior imagen se pueden observar las comunicaciones que se realizan entre el dispositivo final y el servidor de red de LoRaServer. Estas tramas LoRaWAN, autenticadas por el dispositivo final mediante el `NwkSKey`, contienen los parámetros y el contenido de los mensajes recibidos por el *gateway* monocanal en formato JSON, pudiendo observarse algunos valores como el `DevAddr` del dispositivo final y la ID del *gateway* que ha captado dicho mensaje, la localización del mismo, el *Spreading Factor* y el canal con los que ha detectado el mensaje, el sello temporal, etc. Cada una de estas tramas representan una única transmisión por parte de un dispositivo durante una ventana de tiempo. El contenido del *payload* está codificado en Base64 y cifrado mediante la `AppSKey` que anteriormente se había creado en LoRaServer exclusivamente para un dispositivo con una aplicación determinada, por lo que el mensaje no puede ser visionado desde el servidor de red ya que solamente el servidor de aplicación al que corresponde este dispositivo final será el que podrá interpretar dicha información. Las tramas procesadas por el servidor de aplicación se pueden ver en la Figura 4.38.

Ahora, una vez el servidor de red retransmite el mensaje hacia el servidor de aplicación a través de su API interna, la información contenida en el *payload* ya puede ser procesada. A partir del `DevAddr` del dispositivo, este servidor puede identificarlo con su `DevEUI`

```

10:51:34 AM      uplink

  adr: true
  applicationID: "2"
  applicationName: "Moisture_App"
  data: "AGQAGw=="
  devEUI: "a572a350499f578c"
  deviceName: "Moisture_sensor_ABP"
  fCnt: 8
  fPort: 1
  object: {} 2 keys
    humidity: 100
    temperature: 27
  rxInfo: [] 1 item
  0: {} 5 keys
    gatewayID: "2462abfffcab3d4"
    loRaSNR: 9
    location: {} 3 keys
      altitude: 655
      latitude: 37.1444
      longitude: -3.6512
    name: "Single-Channel_gw-ESP32_LoRa"
    rssi: -62
  txInfo: {} 2 keys
    dr: 5
    frequency: 868099975
    
```

Figura 4.38: Transmisiones recibidas por el servidor de aplicación de LoRaServer

y su aplicación, por lo que ya puede descifrar, decodificar y clasificar la información de la humedad del suelo y de la temperatura dentro del objeto configurado. De este modo, le atribuye a cada dispositivo el dato recogido en cada trama recibida y, mediante la integración con InfluxDB, lo almacena de tal forma, como se ha visto en la Figura 4.36. Ahora, Grafana se encarga de realizar la lectura de de los datos de los sensores de la humedad del suelo basados en bobinas y de la humedad para representarlos en las gráficas que se han creado dentro del mismo *dashboard* y que se pueden ver en la Figura 4.39.

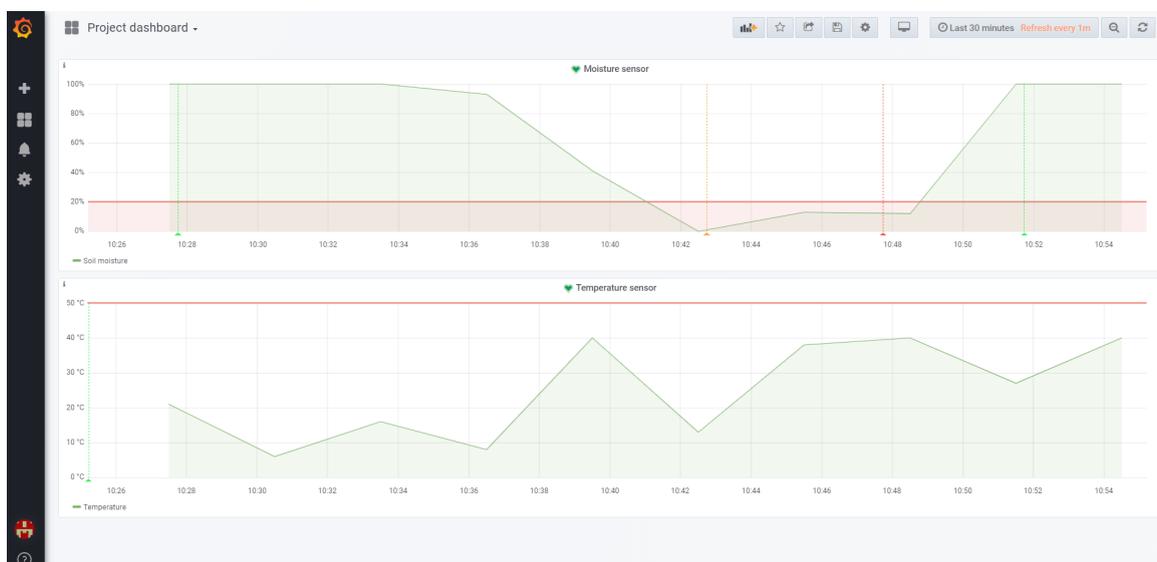


Figura 4.39: Representación gráfica de los datos en Grafana

Como se puede apreciar, en cuanto el valor de la humedad es inferior al 20 % establecido, se dispara una alarma para avisar del bajo nivel de este parámetro avisando al agricultor de la necesidad de volver a regar el cultivo. En este caso, para evitar que se produzca una falsa alarma causada por algún fallo durante la medición del dispositivo, se le ha dado un margen de 5 minutos para los cuales, de mantenerse dicho nivel de humedad por debajo del límite, la alarma termine de dispararse. De esta forma, con el periodo de transmisión configurado, si se producen dos muestras consecutivas por debajo de ese valor, el aviso se completará indicando en la gráfica el momento en el que se detectó dicho nivel bajo de la humedad mediante una marca de color naranja; y cuándo se disparó, con una marca de color rojo. Estas alarmas pueden no limitarse exclusivamente a avisos visuales, sino también a avisos por correo. Además, dicha alarma puede condicionarse a otros factores como la ausencia de muestras durante un determinado tiempo, que los límites máximos se sobrepasen, etc. Para simplificar su uso en este proyecto se reducirá a lo que se puede ver en la Figura 4.40.



Figura 4.40: Disparo de alarma por nivel bajo de humedad en Grafana

De lo contrario, de confirmarse que solamente ha sido una falsa alarma o se haya humedecido de nuevo la tierra, el sistema notificará que todo vuelve a estar correctamente con una marca verde, a partir de la cual el sistema vuelve a permanecer atento de que el nivel de humedad no sea inferior a ese umbral, volviendo a notificarlo en el caso de que se produzca.

Una vez se ha comenzado a experimentar con la red LoRaWAN, se han realizado diversas pruebas para asegurar que el sistema funciona correctamente. Entre ellas, se ha verificado que:

- El sistema ha sido capaz de ofrecer los datos sobre la humedad del suelo y de la temperatura por un tiempo indefinido, llegando a centenares de mensajes sin llegar producirse a la desconexión a causa de algún problema.
- El sistema ha sido capaz de transmitir con éxito el valor de ambos datos de manera segura, sin llegar a perderse ni alterarse.
- El sistema ha sido capaz de abarcar distancias medias con un *Spreading Factor* intermedio como el 10, en un radio de 2km y con buena calidad de la señal, lo que induce a pensar que, efectivamente, el *gateway* logrará recoger datos ofrecidos por nodos finales situados a kilómetros de distancia.

- El sistema no ha recibido información de nodos ajenos a la red privada, lo que hace ver que la seguridad en la autenticación y la integridad de los datos ha sido buena.
- El consumo energético del dispositivo final ESP32 LoRa es muy bajo, llegando a aguantar días con el consumo de la carga almacenada en una *power bank* de 2000mAh. Se prevé que el consumo pueda ser aún inferior no utilizando la pantalla OLED y usando modos de ultra bajo consumo que ofrecen este tipo de módulos como la hibernación o el *deep sleep*, los cuales no se han contemplado en la experimentación de este proyecto.

Una vez se ha comprobado un buen rendimiento con la red LoRaWAN, último componente para tratar y visualizar los datos de este proyecto, se puede comenzar ya a probar un primer prototipo capaz de realizar las lecturas a través del sensor basado en bobinas alimentadas por el circuito electrónico propuesto y su posterior transmisión a un servidor encargado de procesar la información.

#### 4.4. Desarrollo del primer prototipo del sistema final

Una vez conocido el comportamiento de los módulos ESP32 a través de sus pines ADC para la lectura de los datos del sensor, conviene recordar lo visto en la Tabla 4.5, pues los valores pico de tensión del sistema sobrepasan la zona lineal vista en la Figura 4.25, por lo que el circuito de alimentación requiere de una ligera modificación. Para lograr valores inferiores a los 2.7V basta con cambiar la resistencia R7 de la Figura 4.4 por una de menor valor, como por ejemplo 10k $\Omega$ , para así desviar parte de la corriente que llega al nodo de la capacidad C3 hacia dicha resistencia y los valores de tensión de salida se reduzcan.

El siguiente paso es probar esta misma configuración junto con el sistema de bobinas ya introducido en la tierra seca en cuestión de estudio para ver los diferentes valores de tensión de salida obtenidos conforme asciende el nivel de humedad, es decir, vertiendo agua en pequeñas cantidades y dejando que drene hasta el sensor durante un tiempo prudencial para comprobar un valor real de ésta. El resultado tras la toma de varias muestras de tierra y agua pesadas es el mostrado en la gráfica de la Figura 4.41.

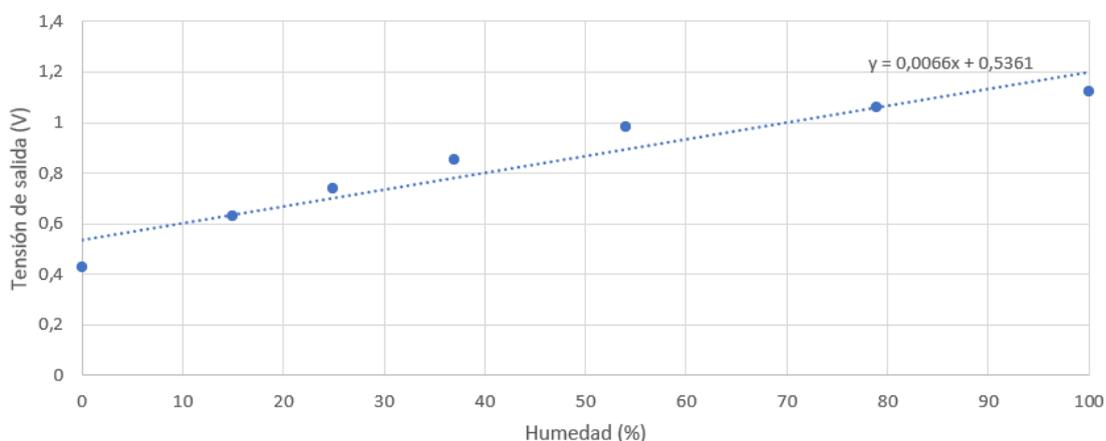


Figura 4.41: Valores de tensión de salida del sensor para la humedad del suelo

Como se puede ver, se produce un crecimiento aproximadamente lineal hasta el 54 % de la humedad, valor a partir del cual este sistema deja de crecer con dicha pendiente para establecerse en valores en torno a la unidad de voltio, con 1.05V y 1.12V para el 79 % y el 100 % de humedad, respectivamente. Sin embargo, un factor que influye notablemente en este experimento es la capacidad de drenaje del suelo en función de su tipología, pues en este caso se trata de un compuesto más arenoso y el recipiente en el que se contenía era pequeño, por lo que el agua estaba siendo evacuada rápidamente cuando el nivel de humedad se aproxima a su límite. Esto induce a pensar de manera más optimista que el sistema puede ofrecer mejores resultados en un entorno real con este mismo compuesto, pero sobretodo en los casos en los que se trabaje con otros compuestos más arcillosos.

Con todo ello, este tipo de sensor de humedad parece ser lo suficientemente preciso para competir con otros tipos de sensores para tal fin accesibles actualmente en el mercado, pues la tensión de salida del circuito de la bobina secundaria es bastante estable al mantenerse en un valor de voltaje límite de nivel de humedad en todo momento como bien las pruebas han confirmado; y la gran mayoría de ellos poseen una precisión similar a la de este nuevo sensor para un precio mayor, además de que éste es más resistente a la corrosión debido a su capa esmalte.

Adicionalmente, para cada uno de estos niveles, se ha comprobado su rango de valores digitales con el dispositivo final ESP32 LoRa encargado de la lectura de los datos de la humedad del suelo tal y como se puede ver en la Tabla 4.9.

| Humedad | Rango digital |
|---------|---------------|
| 0 %     | 0-388         |
| 15 %    | 346-665       |
| 25 %    | 594-820       |
| 37 %    | 767-936       |
| 54 %    | 823-1030      |
| 79 %    | 876-1173      |
| 100 %   | 898-1319      |

Tabla 4.9: Rango digital para el sensor de humedad

Por tanto, se deben sustituir los valores del código del nodo final por los límites inferior del 0 % y superior del 100 %, 0 y 1319, respectivamente. Pese a que la tensión de salida es estable, se obtienen valores digitales que se solapan entre niveles de humedad, así con un error estimado del 10-15 % para un valor de humedad determinado. La principal causa de ello es la propia lectura del dispositivo basado en el ESP32 dado que no es muy precisa al verse bastante afectada por el ruido existente a través del pin que lo conecta al sensor. Para mejorar los resultados debería adquirirse un nuevo módulo capaz de realizar lecturas con mayor exactitud en la conversión analógica a digital. Quizá, una forma de paliar en cierta medida este error sea reajustando de nuevo la resistencia R7, aumentándola para lograr mayores valores de tensión de salida y, por tanto, se reescale la gráfica de la Figura 4.41 con mayor distanciamiento entre dichos niveles, aunque no se puede aumentar su tamaño en exceso dado que la señal sigue sin poder elevarse más allá de la limitación de los 2.7V.

Una vez se ha comprobado el funcionamiento del sensor basado en bobinas estudiado para la medición de la humedad del suelo y su acoplamiento al dispositivo final de la red LoRaWAN, ya solo queda probar todo el sistema de manera conjunta para poder analizar los datos de lectura recogidos con LoRaServer a través de la aplicación de Grafana.

## Capítulo 5

# Prueba final del proyecto y resultados

Como prueba final tanto de la mota sensora encargada de monitorizar la humedad del suelo a través del del sensor basado en bobinas como de la red LoRaWAN en la que se engloba, se ha realizado un último experimento en base a todos los resultados parciales obtenidos durante el desarrollo del proyecto. Ésta ha consistido en la medición de la humedad del mismo tipo de tierra por un corto periodo de tiempo tras ser humedecida hasta llegar a su 100%. Para este caso, se partía con una tierra totalmente seca, la cual restaba tras los experimentos con bobinas realizados en los puntos anteriores.

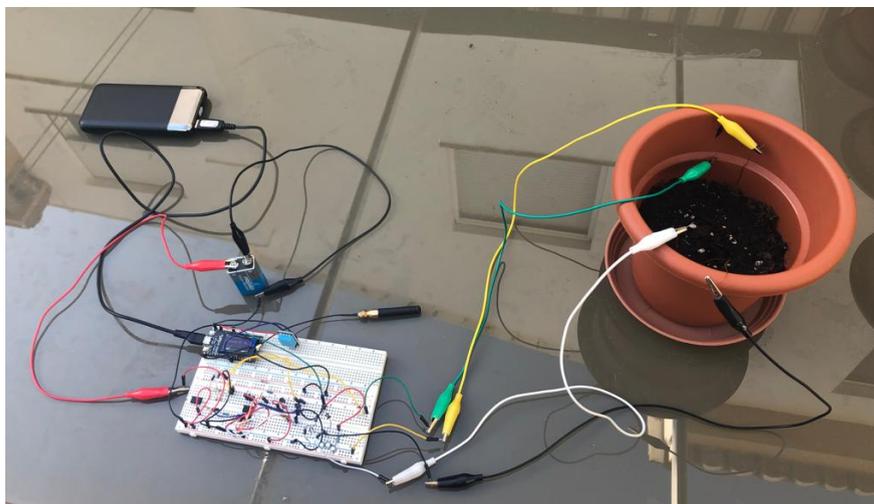


Figura 5.1: Prueba general del sistema en conjunto

Una vez se han montado todos los elementos del sistema tal y como aparece en la Figura 5.1, se han conectado el *gateway*, el nodo final y la Raspberry Pi 3B+ a sus respectivas fuentes suministradoras de potencia. Además, se ha conectado el circuito de alimentación de la bobina primaria a la pila de 9V con la que se ha estado trabajando hasta ahora. A partir de este momento, tanto el sensor como la red comienzan a estar operativos en sus funciones correspondientes, pues todo se ha programado para que baste con ello para ponerlo en marcha de forma automatizada. En la Figura 5.2, se pueden ver tanto el nodo final como el *gateway* en funcionamiento tras haberse transmitido un dato.

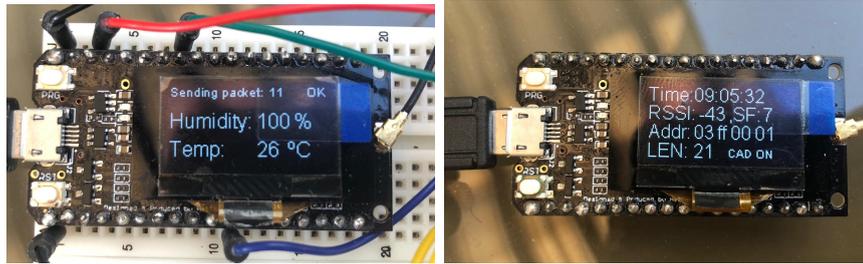


Figura 5.2: Datos recopilados por el nodo final y transmitidos al gateway

Este valor se corresponde con el último valor de humedad muestreado durante esta prueba. Como se puede ver, la transmisión hasta el *gateway* se ha realizado correctamente. Para comprobar ahora que, efectivamente, el dato ha sido recibido con éxito por el servidor de LoRaServer, se puede ver en la Figura 5.3 la misma trama que se ha enviado desde el dispositivo final con el mismo *DevAddr*.

```

UPLINK          9:05:32 AM          UnconfirmedDataUp  03ff0001

▼ rxInfo: {} 1 item
  ▼ 0: {} 12 keys
    gatewayId: "2462abffffcab3d4"
    time: null
    timeSinceGpsEpoch: null
    timestamp: 1812229686
    rssi: -43
    loraSnr: 9
    channel: 0
    rfChain: 0
    board: 0
    antenna: 0
  ▼ location: {} 5 keys
    latitude: 37.1444
    longitude: -3.6512
    altitude: 655
    source: "UNKNOWN"
    accuracy: 0
    fineTimestampType: "NONE"
  ▼ txInfo: {} 3 keys
    frequency: 868099975
    modulation: "LORA"
  ▼ loRaModulationInfo: {} 4 keys
    bandwidth: 125
    spreadingFactor: 7
    codeRate: "4/5"
    polarizationInversion: false

▼ phyPayload: {} 3 keys
  ▼ mhdr: {} 2 keys
    mType: "UnconfirmedDataUp"
    major: "LoRaWANR1"
  ▼ macPayload: {} 3 keys
    ▼ fhdr: {} 4 keys
      devAddr: "03ff0001"
    ▼ fCtrl: {} 5 keys
      adr: true
      adrAckReq: true
      ack: false
      fPending: false
      classB: false
      fCnt: 10
    ▼ fOpts: {} 2 items
      ▼ 0: {} 2 keys
        cid: "RXParamSetupReq"
        ▼ payload: {} 3 keys
          channelAck: true
          rx2DataRateAck: true
          rx1DROffsetAck: false
        ▼ 1: {} 2 keys
          cid: "LinkADRReq"
          ▼ payload: {} 3 keys
            channelMaskAck: false
            dataRateAck: true
            powerAck: true
      fPort: 1
  ▼ frmPayload: {} 1 item
    ▼ 0: {} 1 key
      bytes: "0QB4ww=="
    mic: "adc6fd8a"

```

Figura 5.3: Datos recopilados por el servidor de red de LoRaServer

Dado que, como se comentó anteriormente con la implementación de LoRaWAN en el proyecto, el servidor de red no es capaz de interpretar los datos recibidos, se necesita pasar al servidor de aplicación para comprobar los valores de humedad obtenidos, el cual sí que puede descifrar los datos a través de la clave compartida con el dispositivo final. En la Figura 5.4 se muestra el resultado para el mismo dato transmitido.

```

9:05:32 AM      uplink

  adr: true
  applicationID: "2"
  applicationName: "Moisture_App"
  data: "AGQAGg=="
  devEUI: "a572a350499f578c"
  deviceName: "Moisture_sensor_ABP"
  fCnt: 10
  fPort: 1
  object: {} 2 keys
    humidity: 100
    temperature: 26
  rxInfo: [] 1 item
    0: {} 5 keys
      gatewayID: "2462abfffcab3d4"
      ioRaSNR: 9
      location: {} 3 keys
        altitude: 655
        latitude: 37.1444
        longitude: -3.6512
      name: "Single-Channel_gw-ESP32_LoRa"
      rssi: -43
  txInfo: {} 2 keys
    dr: 5
    frequency: 868099975
    
```

Figura 5.4: Datos procesados por el servidor de aplicación de LoRaServer

Ahora sí, se ha comprobado que la recepción del dato se ha realizado con éxito tras confirmar que el valor se corresponde con el muestreo, además de otros parámetros. Sin embargo, para conocer el resto de valores que el dispositivo final ha leído a través del sensor y transmitido al servidor de aplicación, se puede utilizar la aplicación de Grafana (Figura 5.5), la cual lee los datos indexados por la integración de LoRaServer con InfluxDB.



Figura 5.5: Datos recopilados en la aplicación

A partir de esto, se ha comprobado que, tras humedecer ligeramente la tierra, se ha obtenido un valor del 11 %. Tras ello, volviendo a verter agua hasta igualar la masa del agua a la de la tierra, el nivel porcentual de humedad se ha elevado hasta el 100 %, el mismo valor que para la realidad según la Ecuación 2.1. Este nivel se mantiene a lo largo del

periodo de tiempo muestreado tiempo sin llegar a variar para el dispositivo final. También se puede ver cómo se dispara una alarma para avisar de la necesidad de riego del suelo tras detectar un nivel de humedad inferior al 20 % con el comienzo de la prueba y que posteriormente se desactiva tras alcanzar el 100 % de humedad. También la temperatura ha subido 2°C desde el comienzo de la prueba hasta los 26°C.

Por tanto, como conclusión de esta prueba del prototipo final del proyecto, se ha logrado implementar todo el sistema de forma que se pueda conocer en todo momento el nivel de humedad del suelo, pues éste ha reaccionado ante el cambio del nivel de humedad de la tierra de forma gradual, primero partiendo desde un 0 % de humedad, luego con un valor bajo para ver hasta qué punto llega a variar y finalmente con el 100 % de la humedad para asegurarse de que el valor ni sobrepasa el límite ni queda por debajo de éste..

## Capítulo 6

# Conclusiones y líneas futuras

En este proyecto se ha presentado la necesidad subsistente a lo largo de la historia de los agricultores de conocer el nivel de humedad del suelo a fin de poder controlar y optimizar el riego a manta de las diferentes especies presentes en un cultivo. Con ello, se ha logrado comprender el comportamiento del agua en la tierra en función del tipo de suelo y la temperatura del entorno, principalmente, definiéndose así una Capacidad de Campo (CC) ligada a la máxima cantidad de agua que una planta es capaz de absorber; y el Punto de Marchitamiento (PM) como la humedad límite por la que cualquier planta deja de poder absorber agua y morir a causa de su ausencia. Ambos límites se corresponden en este proyecto con un 100 % y un 0 % de humedad, respectivamente. Además, para tratar este problema desde una perspectiva más actualizada, se ha pretendido que el agricultor pueda conocer en tiempo real el nivel de humedad de cada punto de la superficie del terreno desde cualquier lugar, optando así por una posición más próxima al *Internet de las Cosas* e investigando su mercado para hacer de este proyecto el más asequible posible en lo que a coste económico se refiere.

La solución adoptada ha consistido en crear un sensor basado en el fenómeno de la inducción electromagnética producido por dos bobinas formadas por hilo de cobre enrollado: una primaria alimentada por una señal de corriente y una secundaria a la cual se le induce una fuerza electromotriz. Como se ha estudiado previamente, se ha requerido de ciertas características del sistema de bobinas para lograr mayores inductancias que permitan una mayor inducción de voltaje y, con ello, hacerlo lo más eficiente posible en cuanto a consumo energético. Además, otro factor muy importante que afecta a las inductancias de las bobinas ha sido la composición tanto de la tierra de las que se ven rodeadas las bobinas como la de agua que se drena hasta su interior. De hecho, estudiando de una forma más teórica el comportamiento del agua pura ante un campo magnético, al tratarse ésta de un material diamagnético, se esperaba que la tensión inducida decreciera a medida que aumentaba el nivel del agua. Sin embargo, como se ha visto durante la experimentación, existen muchas variables relacionadas con el contenido del agua y de la tierra que pueden alterar el resultado y por ello obtener unos resultados u otros, viendo así que esta tensión puede también aumentar con el aumento de la humedad. La temperatura también es otro factor adicional que condiciona el comportamiento de las bobinas. Es por este motivo por el que se ha pretendido compactar de la mejor forma posible la tierra que rodea la bobina par así evitar que cambios de temperatura afecten en tal medida.

Dado que, ante la situación de crisis global originada por el virus SARS-CoV-2, no se ha podido acceder a la instrumentación de laboratorio necesaria para realizar las mediciones

en la experimentación con las bobinas, mediante los conocimientos adquiridos durante esta etapa universitaria se ha logrado desarrollar un circuito electrónico alternativo capaz de generar señales de corriente variable que han permitido la inducción de voltaje entre bobinas para así hallar el pico de tensión ubicado en la frecuencia de resonancia. Esto ha impedido que se conozcan los valores exactos de dicha frecuencia, aunque sí se han logrado conocer valores más o menos próximos a éstas que permiten también un buen resultado lineal. Por ello, se ha priorizado la linealidad frente a la frecuencia de resonancia ya que con ella se pueden llegar a diferenciar correctamente los valores de tensión en función del nivel de humedad presente en el suelo, pues dicha frecuencia es útil únicamente si también presenta un crecimiento o decrecimiento lineal. Finalmente, el primer prototipo ha sido el único con el que se ha logrado obtener resultados. Más tarde, se ha comprobado que el sensor es capaz de medir correctamente hasta cierto nivel de humedad, haciéndose algo más inestable a partir de dicho punto. Sin embargo, dado que las pruebas no se han realizado en un entorno del todo real como puede ser en la vega de Granada con mayor profundidad y otro tipo de suelo, es posible que los resultados mejoren para el sensor.

Además, se ha elaborado un prototipo de circuito de alimentación con el que poder alimentar las bobinas una vez se distribuyan por el terreno a fin de medir la humedad de diferentes profundidades del suelo en ubicaciones distribuidas en el terreno de cultivo. Este circuito se ha basado en el circuito integrado 555, capaz de generar pulsos cuadrados. Gracias a los transistores BJT con los que se contaba, se ha podido invertir parte de la señal para generar corriente AC a partir de dichos pulsos y lograr así mayores valores pico a pico para la mayor eficiencia de la potencia consumida. Esto requería también de la adaptación de la capacidad en serie con la bobina para hacer resonante el circuito a la frecuencia de trabajo de la bobina aunque, al no conocer el valor real de la inductancia, se ha aproximado ésta mediante su experimentación con la unión de capacidades para dar con aquella con la que se lograra un mayor valor de tensión inducida, así logrando acercarse al valor para el que se cumple dicha característica.

Una vez realizado esto, se ha pasado a la construcción de una red inalámbrica que permitiera la recopilación de los datos de cada nodo para su posterior procesamiento. Tras haber concluido con que la tecnología LoRaWAN ofrece mayores ventajas sobre otras para este entorno en cuanto a sus características, se ha investigado ésta para conocer con más detalle su funcionamiento. Con ello y tras haber adquirido un par de módulos ESP32 LoRa v1 de TTGO para la demostración, se ha podido implementar un dispositivo final encargado de recoger los valores de humedad a diferentes niveles del suelo y un *gateway* monocanal localizado a media distancia que recoge de forma inalámbrica toda esa información y la envía a un servidor de LoRaServer que se encarga de procesar la información e indexarla en una base de datos de InfluxDB para que pueda ser accesible desde cualquier aplicación, en este caso Grafana. Todos estos servicios se han configurado en una Raspberry Pi 3B+.

Tras ello, se ha conectado la bobina primaria del prototipo escogido al circuito de alimentación diseñado y se ha conectado la salida del sistema al dispositivo final, ambos alimentados de forma independiente, aunque se contempla la posibilidad de adquirir una batería de mayores prestaciones para ambas unidades y unificar estas fuentes de alimentación. Con ello, se ha comprobado los resultados finales de este proyecto, con los que se ha demostrado un buen funcionamiento del sistema.

Para concluir, se ha realizado un desglose del coste final del proyecto, el cual se define en la Tabla 6.1. El coste total de los materiales ha aumentado dado que se ha debido

adquirir un lote más amplio de componentes electrónicos y baterías tanto para el montaje del sistema como para las pruebas realizadas con bobinas. Además, el tiempo empleado en este proyecto ha crecido considerablemente dadas las complicaciones ocasionadas por el SARS-CoV-2, por las que se ha tenido que improvisar para lograr estos resultados. Sin embargo, dado que se prevé desplegar un gran número de nodos para una situación real, los costes de operación asociados a la configuración tanto de dichos nodos como del servidor se mantienen. El beneficio total previsto para este proyecto es de 2907.35€.

| Detalles                                   | Cantidad       | Precio por unidad |
|--|----------------|-------------------|
| <b>MATERIALES (-)</b>                      |                |                   |
| Bobinado de cobre                          | 2x 200 m       | 4.85€             |
| Circuito Integrado 555                     | 1x 10 pcs      | 1.98€             |
| Componentes electrónicos y cableado        | 1x 1 pack      | 26.55€            |
| Módulos ESP32 LoRa TTGO v1                 | 2x 1 pcs       | 16.5€             |
| Raspberry Pi 3B+                           | 1x 1 pcs       | 35€               |
| Baterías                                   | 4x 1 pcs       | 0.98€             |
| Sensor de temperatura DHT11                | 1x 1 pcs       | 1.5€              |
| SUB-TOTAL                                  |                | <u>111.65€</u>    |
| <b>TIEMPO EMPLEADO (+)</b>                 |                |                   |
| Fase de investigación                      | 15x 10h/semana | 900€              |
| Fase de preparación                        | 2x 5h/semana   | 60€               |
| Fase de experimentación                    | 8x 25h/semana  | 1200€             |
| Fase de desarrollo y pruebas               | 5x 18h/semana  | 540€              |
| Fase de redacción de la memoria            | 8x 6h/semana   | 288€              |
| TIEMPO TOTAL EMPLEADO                      | 498 horas      | <u>2988€</u>      |
| <b>DESPLIEGUE DE LA RED. OPERACIÓN (+)</b> |                |                   |
| Configuración de un nodo final             | 1x nodo        | 2€                |
| Configuración de un nodo de red            | 1x nodo        | 4€                |
| Configuración de un servidor               | 1x servidor    | 25€               |
| SUB-TOTAL                                  |                | <u>31€</u>        |
| <b>COSTE TOTAL DEL PROYECTO</b>            |                | <b>2907.35€</b>   |

Tabla 6.1: Presupuesto final del proyecto

Por último, se puede concluir con que el resultado del trabajo realizado en este proyecto ha sido satisfactorio y el sistema resultante ha sido bastante bueno teniendo en cuenta las limitaciones del dispositivo final y las circunstancias en las que se ha realizado la experimentación, pues se ha conseguido equiparar con otros sensores análogos actualmente accesibles en el mercado.

Como trabajo futuro se sugiere proseguir con la experimentación de otros tipos de bobinas, esta vez mediante instrumentación más sofisticada de laboratorio que permita realizar un estudio más exhaustivo y preciso del comportamiento de éstos en el mismo tipo de tierra y la ampliación a otros más arcillosos o incluso más arenosos para la búsqueda de patrones con los que se pueda generalizar su uso a otras zonas. También se propone el desarrollo de un circuito de alimentación único con múltiples sensores de humedad del suelo basados en bobinas a diferentes niveles de profundidad del suelo para comprobar el grado de afección y así dar a conocer la distancia óptima entre ellas.



# Bibliografía

- [1] G. Costas. Ósmosis, ¿qué es y qué función tiene? *CienciayBiologia.com*, marzo 2019. <https://cienciaybiologia.com/osmosis/>, último acceso: 06/07/20.
- [2] Dr. Juan José Ibáñez. Niveles de humedad del suelo y agua disponible: El agua en el suelo 3. *Madrid+D Blogs*, junio 2006. <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2006/06/26/33002>, último acceso: 06/07/20.
- [3] Mauricio Pastor Muñoz. Consideraciones sobre el carácter social del movimiento bagaudico en la Gañia e Hispania a fines del Imperio romano. *Memorias de historia antigua*, (2):205–216, 1978.
- [4] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. Métodos de medición de humedad del suelo: del campo al laboratorio. *PortalFruticola.com*, agosto 2018. <https://www.portalfruticola.com/noticias/2018/08/30/metodos-de-medicion-de-humedad-del-suelo-del-campo-al-laboratorio/>, último acceso: 06/07/20.
- [5] Rempeng Chen. Time Domain Reflectometry for Water Content Measurement of Municipal Solid Waste. *Environmental Engineering Science*, (29(6)):486–493, junio 2012.
- [6] Ricardo Trumper y Moshe Gelbman. Investigating electromagnetic induction through a microcomputer-based laboratory. *Physics Education*, 35(2):90–95, febrero 2000.
- [7] Ley de Ohm. *Wikipedia*, junio 2020. [https://es.wikipedia.org/wiki/Ley\\_de\\_Ohm](https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Ohm), último acceso: 06/07/20.
- [8] José L. Fernández y Gregorio Coronado. Fuerza de Lorentz. *FisicaLab*. <https://www.fisicalab.com/apartado/ley-de-lorentz>, último acceso: 06/07/20.
- [9] Alexander L Kholmetskii. The Faraday induction law and field transformations in special relativity. *Apeiron*, 10(2):118, 2003.
- [10] Greg Gbur, Daniel James, and Emil Wolf. Energy conservation law for randomly fluctuating electromagnetic fields. *Physical Review E*, 59(4):4594, 1999.
- [11] Ley de Lenz. *Wikipedia*, junio 2020. [https://es.wikipedia.org/wiki/Ley\\_de\\_Lenz](https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Lenz), último acceso: 06/07/20.
- [12] Peter Monk et al. *Finite element methods for Maxwell's equations*. Oxford University Press, 2003.

- [13] F. B. J. Leferink. Inductance calculations; methods and equations. pages 16–22, agosto 1995.
- [14] Inductancia, Campo magnético, Fuerza contraelectromotriz (fcem). *Unicrom*, 2016. <https://unicrom.com/inductancia-campo-magnetico-y-fuerza-contraelectromotriz-fcem>, último acceso: 06/07/20.
- [15] Julia Torres. Inductancia: Fórmula y unidades, autoinductancia. *Lifeder.com*. <https://www.lifeder.com/inductancia/>, último acceso: 06/07/20.
- [16] Charles Kittel. Theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic materials at microwave frequencies. *Phys. Rev.*, 70:281–290, septiembre 1946.
- [17] Universidad de Vigo. Magnetismo. marzo 2012. [http://quintans.webs.uvigo.es/recursos/Web\\_electromagnetismo/magnetismo\\_definiciones.htm#permeabilidadmagnetica](http://quintans.webs.uvigo.es/recursos/Web_electromagnetismo/magnetismo_definiciones.htm#permeabilidadmagnetica), último acceso: 06/07/20.
- [18] Vencislav Cekov Valchev and Alex Van den Bossche. *Inductors and transformers for power electronics*. CRC press, 2018.
- [19] José Sánchez Fernández. Diseño y parametrización de inductores con núcleo de hierro. *Scientia et technica*, 1(41), 2009.
- [20] Conceptos de electrotecnia para aplicaciones industriales. Factor de calidad. *Sapiensman.com*. <http://www.sapiensman.com/electrotecnia/problemas28.htm>, último acceso: 06/07/20.
- [21] P.P. Ray. A survey on internet of things architectures. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 30(3):291 – 319, 2018.
- [22] Bushra Rashid and Mubashir Husain Rehmani. Applications of wireless sensor networks for urban areas: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 60:192 – 219, 2016.
- [23] About LoRa Alliance. *LoRa Alliance*. <https://lora-alliance.org/about-lora-alliance>, último acceso: 06/07/20.
- [24] Ferran Adelantado, Xavier Vilajosana, Pere Tuset-Peiro, Borja Martinez, Joan Melia-Segui, and Thomas Watteyne. Understanding the limits of LoRaWAN. *IEEE Communications magazine*, 55(9):34–40, 2017.
- [25] Paul Pickering. Develop LoRa for low-rate, long-range IoT applications. *DigiKey*, junio 2017. <https://www.digikey.es/en/articles/develop-lora-for-low-rate-long-range-iot-applications>, último acceso: 06/07/20.
- [26] What is the LoRaWAN Specification? *LoRa Alliance*. <https://lora-alliance.org/about-lorawan>, último acceso: 06/07/20.
- [27] Dr. Himani Goyal. Understanding of IC 555 Timer and IC 555 Timer Tester. *International Journal of Inventive Engineering and Sciences*, 3(2):4–6, enero 2015.
- [28] Texas Instruments. 555 IC datasheet. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne555.pdf>, último acceso: 06/07/20.

- [29] Semtech. SX1276 datasheet. <https://www.mouser.com/datasheet/2/761/sx1276-1278113.pdf>, último acceso: 06/07/20.
- [30] Cliff Wootton. *Serial Peripheral Interface (SPI)*. Apress, Berkeley, CA, noviembre 2016.
- [31] Raspberry Pi 3B+ datasheet. <https://static.raspberrypi.org/files/product-briefs/Raspberry-Pi-Model-Bplus-Product-Brief.pdf>, último acceso: 06/07/20.
- [32] OrCAD. <https://www.orcad.com/>, último acceso: 06/07/20.
- [33] Documentación de ChirpStack. <https://www.chirpstack.io>, último acceso: 06/07/20.
- [34] Zhi Yang, Wentai Liu, and Eric Basham. Inductor modeling in wireless links for implantable electronics. *IEEE Transactions on Magnetics*, 43(10):3851–3860, 2007.
- [35] ICM7555 datasheet. <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/ICM7555.pdf>, último acceso: 06/07/20.
- [36] Coil inductance calculator. *666Pacific.com*. <http://www.66pacific.com/calculators/coil-inductance-calculator.aspx>, último acceso: 06/07/20.
- [37] Mar Parra Boronat. *Design and development of a low-cost soil moisture sensor based on solenoid coils*. PhD thesis, 2019.
- [38] Josep Balcells. *Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos*. Marcombo, 2005.
- [39] Robert Lie. Quick guide LoRa Server installation. 2019. [https://www.mobilefish.com/developer/lorawan/lorawan\\_quickguide\\_loraserver\\_installation.html](https://www.mobilefish.com/developer/lorawan/lorawan_quickguide_loraserver_installation.html), último acceso: 06/07/20.
- [40] Paquete de Espressif. [https://dl.espressif.com/dl/package\\_esp32\\_index.json](https://dl.espressif.com/dl/package_esp32_index.json), último acceso: 06/07/20.
- [41] Jack Kersing y Marteen Westenberg. Repositorio GitHub ESP-1ch-Gateway-v5.0. <https://github.com/kersing/ESP-1ch-Gateway-v5.0>, último acceso: 06/07/20.
- [42] IBM. Repositorio GitHub librería LMIC. <https://github.com/matthijskooijman/arduino-lmic>, último acceso: 06/07/20.
- [43] Pablo Rodríguez. Repositorio GitHub del proyecto TFGcode. <https://github.com/paroma96/TFGcode>, último acceso: 06/07/20.
- [44] InfluxDB. Documentación de InfluxDB (v1.8.0). <https://docs.influxdata.com/influxdb/v1.8>, último acceso: 06/07/20.
- [45] Grafana. Documentación de Grafana (v7.0). <https://grafana.com/docs/grafana/latest/>, <https://grafana.com/docs/grafana/latest/>, último acceso: 06/07/20.



