

Alejandro Teodoro Sinisterra

Desarrollo de un lector de UHF RFID de bajo coste

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Dirigido por Antonio Lázaro Guillén

Grado de Ingeniería de Sistemas y Servicios de Telecomunicaciones



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2021

Índice

1. Introducción.....	4
1.1 Objetivos.....	4
1.2 Motivaciones	4
1.3 Estructura de la memoria.....	4
2. Tecnología RFID	6
2.1 Introducción.....	6
2.2 Historia	6
2.3 Funcionamiento	8
2.4 Arquitectura	9
2.4.1 Etiquetas	9
2.4.1.1 El código EPC	10
2.4.1.2 Chip RFID	11
2.4.1.3 Alimentación	11
2.4.2 Lector.....	13
2.4.2.1 Componentes	14
2.4.2.2 Tipos de lectores.....	15
2.4.2.3 Funcionamiento	15
2.4.3 Antenas	17
2.5 Frecuencias	18
2.5.1 Low Frequency (125 KHz).....	19
2.5.2 High Frequency (13.56 MHz)	19
2.5.3 Ultra High Frequency (433 MHz, 860 MHz, 928 MHz).....	20
2.5.3.1 Regulación Global de Frecuencias para UHF RFID.....	21
2.5.4 Microwaves (2,45 GHz, 5,8GHz).....	22
2.6 Codificación y Modulación	23
2.6.1 Codificación	23
2.6.2 Modulación.....	24
2.7 Aplicaciones	26
Referencias.....	27
3. Sistema de caracterización de tags	29
3.1.1 Programación Arduino	29
3.1.2 Conexión antena externa	32
3.1.2.1 Diseño del soporte con OpenScad.....	33

3.1.2.2	Escaneo de las etiquetas en la cámara anecoica	34
3.1.3	Cálculo teórico del “read range”	35
3.1.4	Resultados obtenidos	36
4.	Simulación de una aplicación real de RFID	48
4.1.1	Escaneo y subida de los códigos EPC al servidor MQTT.....	48
4.1.1.1	Programación Arduino	48
4.1.1.2	Conexión Arduino Uno y Esp32	48
4.1.1.3	Envío de datos al bróker MQTT.....	51
4.1.2	Creación de una base de datos mediante Python.....	52
4.1.3	Búsqueda filtrada de los datos almacenados	54
	Referencias.....	55
5.	Conclusiones y líneas futuras	57

1. Introducción

La tecnología de identificación por radiofrecuencia o RFID (*“Radio Frequency Identification”*), ha protagonizado un crecimiento exponencial durante los últimos años. Su principal ventaja es la posibilidad de realizar lecturas a distancia, mediante un lector y sin necesidad de contacto físico ni visual. Además, permite la realización de lecturas y escrituras de información simultáneamente.

Esta tecnología se fundamenta en la comunicación entre los dos elementos que la forman. Una etiqueta o tag y un lector. El lector realiza la función de interrogador mientras que el tag es el que contiene la información que se desea obtener. Las características de estos dos elementos definen las propiedades del sistema RFID que forman (alcance, potencia necesaria, frecuencia de funcionamiento...)

Este proyecto busca diseñar un sistema de caracterización de tags de pago coste. Esto permite conocer la respuesta en frecuencia de las etiquetas, es decir, la distancia máxima de trabajo y la potencia mínima necesaria para su correcto funcionamiento. Se busca una alternativa a los sistemas de caracterización existentes, cuyo coste en el mercado es bastante elevado.

Para acabar de comprender el funcionamiento de un sistema de RFID, se recreará una aplicación de identificación por radiofrecuencia, donde se escanearán los tags y se transmitirá la información que contienen mediante un protocolo de comunicación para su posterior almacenado estructurado en una base de datos.

1.1 Objetivos

El primer objetivo es el estudio y realización de un sistema de caracterización de etiquetas de RFID. Para ello se programará desde cero un lector de RFID, se estudiarán y prepararán los medios necesarios y se llevará a la práctica con un estudio experimental. Por último, se analizarán los resultados obtenidos y se extraerán conclusiones.

El segundo objetivo de este proyecto es estudiar y comprender el funcionamiento detallado de un sistema de RFID. Se busca profundizar en los conocimientos tanto teóricos como prácticos adquiridos previamente. Para ello no solo se repasarán los conceptos teóricos, sino que se realizará una simulación de una aplicación de RFID real.

1.2 Motivaciones

La motivación principal para la realización de este proyecto es el conocimiento de una nueva tecnología muy interesante que está sufriendo una evolución exponencial en los últimos 10 años, a pesar de que su origen se remonte a los años 40.

Otra de las motivaciones para este trabajo es la visión comercial que se consigue con la reducción de costes del sistema, la cual debería estar presente en todo proyecto de ingeniería.

1.3 Estructura de la memoria

La memoria está estructurada en tres apartados principales:

En el primero se revisarán los conceptos teóricos relacionados con la tecnología RFID, haciendo hincapié en los relacionados con la parte experimental, como son: las frecuencias de funcionamiento o la transmisión de la información entre tag y lector.

Una vez revisados los conceptos teóricos, a continuación, se presentará el trabajo práctico realizado. El trabajo consiste en el desarrollo de un lector UHF RFID de bajo coste. Para llevarlo a cabo, se ha programado una “*shield*” comercial de Arduino que actúa como lector de tags de RFID.

El interés radica en programar el lector de manera que permita caracterizar tags de UHF, es decir, conocer la respuesta de los tags en las diferentes bandas de frecuencia utilizadas globalmente. La diferencia que existe respecto a los lectores que se utilizan normalmente para la caracterización de tags es el precio, siendo mucho menor el del dispositivo utilizado en este trabajo.

La tercera parte del trabajo consiste en programar el lector para que lea los códigos EPC, entre otros valores, de los tags y los almacene en una base de datos a través de la tecnología MQTT. Para realizarlo, conectaremos el Arduino Uno con un ESP32 para dotar de conexión a Internet al sistema. Posteriormente, procesaremos los datos para realizar búsquedas filtrando según diferentes aspectos como el código EPC escaneado, la fecha o la hora.

Finalmente, se incluye un apartado en el que se redactarán las conclusiones e impresiones finales sobre el trabajo realizado.

2. Tecnología RFID

2.1 Introducción

Las siglas RFID (*“Radio Frequency Identification”*), hacen referencia a lo conocido como identificación por radiofrecuencia. Consiste en una tecnología inalámbrica de transmisión y almacenamiento de datos, que permite la identificación sin contacto de elementos mediante radiofrecuencia (RF). Se trata de una tecnología muy presente actualmente, cuyos usos incluyen desde sistemas industriales automatizados, control de acceso, identificación de animales y pasaportes electrónicos hasta aplicaciones médicas, emisión de billetes y seguimiento de existencias [1].

La comunicación RFID se basa en la comunicación entre un lector y una etiqueta o tag, mediante ondas electromagnéticas. La etiqueta consta de una antena y un chip, conocido como transponder, con la capacidad de memoria necesaria para almacenar la información de los objetos a identificar a los que se encuentra adherido.

El sistema de transmisión de información varía según la frecuencia en la que opera. De esta manera, un sistema RFID se basa en sistemas de acoplamiento. El tipo de acoplamiento afecta directamente al rango de lectura entre las etiquetas y los lectores. Entre estos acoplamientos existen acoplamientos electromagnéticos, inductivos, magnéticos y capacitivos.

En toda comunicación realizada por medio de ondas electromagnéticas, se requiere de un campo sinusoidal variable o, dicho de otra manera, de una onda portadora. La comunicación se consigue aplicando una variación a este campo, ya sea en amplitud, frecuencia o fase, en función de los datos a transmitir. A este proceso se le conoce como modulación. En los sistemas RFID se pueden aplicar diferentes técnicas de modulación: ASK (*“Amplitude Shift Keying”*); FSK (*“Frequency Shift Keying”*) y PSK (*“Phase Shift Keying”*) [2].

En función de la frecuencia de la tecnología RFID utilizada, el mecanismo de comunicación o propagación puede ser inductivo, a bajas frecuencias (rango de kHz o MHz), o mediante ondas de radio en campo lejano, a frecuencias superiores (UHF, microondas). La frecuencia de operación es un aspecto físico fundamental en el uso de la tecnología RFID, ya que determina aspectos de la etiqueta como la capacidad de transmisión de datos, la velocidad y tiempo de lectura, el radio de cobertura o el coste de la etiqueta.

2.2 Historia

Previo al desarrollo de la historia y evolución de la tecnología RFID, es importante remarcar los descubrimientos llevados a cabo por James Clerk Maxwell, Heinrich Rudolf Hertz y Guglielmo Marconi, en los campos de transmisión de datos de forma inalámbrica en una frecuencia del espectro electromagnético y el uso de ondas de radio para la lectura de tags. Estos avances fundamentaron la base de la actual tecnología RFID.

No existen una fecha exacta en la que aparece la tecnología RFID. Los primeros prototipos se remontan a la década de los años cuarenta del siglo XX, durante la Segunda Guerra Mundial. Durante el conflicto bélico, las fuerzas aéreas de los ejércitos de Estados Unidos, Japón y Alemania utilizaban el conocido RADAR (*“Radio Detection And Ranging”*), que permitía la detección de aeronaves en un rango cercano. Sin embargo, esta tecnología no permitía identificar si se trataba de un avión propio o del enemigo. De esta manera, surgió el transpondedor de IFF (*“Identification Friend or Foe”*) o identificador

amigo-enemigo, creado por los británicos que permitía distinguir a los pilotos entre naves aliadas o enemigas. Éste se considera el primer prototipo de RFID pasivo [3].

En el año 1945, el capítulo europeo de la Segunda Guerra Mundial había concluido, y Estados Unidos y la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) analizaban su futura relación. Durante una reunión en la embajada estadounidense, un grupo de niños de la Organización de Jóvenes Pioneros de la Unión Soviética regalaron a Averell Harriman, el embajador estadounidense, una escultura tallada a mano del sello ceremonial de EE. UU. Más tarde se lo conocería simplemente como La Cosa.

Esta escultura no fue registrada por el equipo de seguridad americano ya que no se encontraron ni micrófonos, ni cables ni baterías. De esta manera Harriman colgó la escultura en la pared de su estudio donde mantuvo conversaciones privadas durante siete años, tiempo que tardaron en descubrir que las filtraciones provenían de La Cosa.

El dispositivo de escucha se encontraba dentro de la escultura, como se puede observar en la figura 1. Se trataba de una pequeña antena de un cuarto de longitud de onda, unida a una membrana capacitiva, que servía como micrófono. No necesitaba una batería ya que se activaba a través de ondas de radio transmitidas hacia la embajada estadounidense por los soviéticos. Utilizaba la energía de la señal recibida para alimentarse y transmitir. Cuando no recibía señal, se apagaba.

Este invento fue desarrollado por León Theremin, cuyo dispositivo de espionaje soviético está considerado como un precursor de la tecnología de identificación por radiofrecuencia, especialmente en el ámbito de los tags pasivos [4].



Figura 1. Imagen de La Cosa, que contenía el primer prototipo de tag pasivo creado por León Theremin en el año 1945

Fuente: [https://en.wikipedia.org/wiki/The_Thing_\(listening_device\)](https://en.wikipedia.org/wiki/The_Thing_(listening_device))

Fue en 1948 cuándo Harry Stockman publicó el primer artículo que hablaba de este tipo de tecnología. El artículo titulado “*Communications by Means of Reflected Power*”, fue publicado en la revista “*Proceedings of the IRE*”. En él, el científico predijo que harían falta varios años más de investigaciones para poder llevar a cabo aplicaciones prácticas con RFID y su uso comercial. Este artículo está considerado como la investigación más próxima al RFID de la época.

La primera patente fuera del ámbito militar fue presentada en el año 1973, por el estadounidense Mario W. Cardillo. Se trataba de una patente de una etiqueta RFID activa y con memoria reescribible. Estaba centrada en la identificación de vehículos, pacientes y tarjetas de crédito. Su uso no fue muy extendido debido al alto coste que suponía en aquella época, pese a ello fue el precursor de la tecnología RFID moderna.

La primera patente que utilizó el término RFID (identificación por radiofrecuencia) fue concedida en el año 1983 por un inventor estadounidense Charles Walton. Aunque muchas personas contribuyeron y ayudaron a la invención de la tecnología RFID, Charles Walton publicó 10 patentes para varios dispositivos relacionados con RFID. Su 1ª patente RFID concedida fue en los años setenta con el diseño de un “Identificador emisor de radiofrecuencia portátil”.

Durante los siguientes años, los sistemas tendieron a evolucionar hacia frecuencias mayores (de baja frecuencia (125 KHz) a alta frecuencia (13.56 MHz), y de alta frecuencia a ultra alta frecuencia (868 MHz – 960 MHz)). A su vez, se produjo una reducción del coste de fabricación de los dispositivos, lo que hacía que la tecnología RFID fuera más accesible y utilizada.

En el año 1999, se fundó el Auto-ID Center, en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT). Este centro permitió un desarrollo acelerado del RFID, con investigaciones dirigidas a analizar la posibilidad de colocar etiquetas RFID de bajo coste en productos, para poder realizar un seguimiento a lo largo de la cadena de suministros.

Entre el año 1999 y 2003, el Auto-ID Center recibió el apoyo de numerosos inversores, entre los que se encontraba el Departamento de Defensa de los Estados Unidos y los principales fabricantes de sistemas de RFID. Como consecuencia, se desarrolló el “*Electronic Product Code*” (EPC). Este código, formado por una combinación de números, identifican unívocamente objetos a lo largo de una cadena de suministros. Esta idea permitía reducir los costes, mantener identificados en todo momento los productos etiquetados y tenerlos inmersos en una base de datos en Internet.

No obstante, en octubre de 2003, Auto-ID Centre fue sustituida por Auto-ID Labs y EPCGlobal, cuya principal misión era el desarrollo del sistema EPC y de los estándares que normalizan la tecnología RFID (el EPCglobal Gen 1, del 2002 al 2005, y EPCglobal Gen 2, en 2004). Más tarde, en 2006, fue creado el estándar ISO 18000-6C a partir del EPC Gen 2 (abreviatura de EPCglobal UHF Class 1 Generation 2) con algunas modificaciones. A lo largo de los últimos años, la creación de los estándares y la reducción de los costes de fabricación han permitido un crecimiento exponencial del RFID, encontrándose hoy día en muchos establecimientos que han optado por usar este tipo de tecnología por su gran eficiencia [5].

Actualmente, la tecnología RFID es utilizada en multitud de campos, ya que permite transportar datos y ser capturados electrónicamente. En el mundo actual, basado en la información, el presente y el futuro del RFID es de suma importancia, ya que cada vez se desecha más la opción del uso de cableado y se requieren radios de acción cada vez más elevados. El interés actual por el comercio virtual hace del RFID uno de los sistemas más globales e importantes de los utilizados hoy en día, dejando de lado, cada vez más, a sistemas antiguos como el código de barras.

En la actualidad, la tecnología RFID presenta un gran avance, pudiendo realizarse sistemas con un área relativamente grande, una rapidez considerable y suficiente para las aplicaciones en las que se utiliza y un consumo cada vez menor de los circuitos. El futuro del RFID parece ir encaminado a mejorar todos estos últimos aspectos, para lo cual necesita ir de la mano de investigaciones y avances en multitud de campos de la tecnología moderna.

2.3 Funcionamiento

La tecnología RFID funciona mediante la transmisión de datos a través de campos electromagnéticos. Entre los elementos necesarios para su funcionamiento se encuentran un

lector, que emite y recibe ondas de radio; las denominadas etiquetas o tags, formadas por un chip; una antena integrada y un “Software”, que actúa como base de datos.

El funcionamiento es el siguiente: el lector emite por medio aéreo señales electromagnéticas, a una frecuencia determinada. Si alguna etiqueta se encuentra en el rango de transmisión de la señal, se activa el microchip y mediante la antena integrada responde, con otra señal codificada, con la información que contiene (generalmente un código identificador EPC). La señal emitida por la etiqueta es recibida por el lector, que procesa la información recibida y realiza la acción correspondiente en su base de datos. La estructura y elementos que forman el sistema son los que se encuentran representados en la figura 2 [6].

En los siguientes apartados se explicará detalladamente los diferentes componentes y tecnologías que componen esta tecnología.

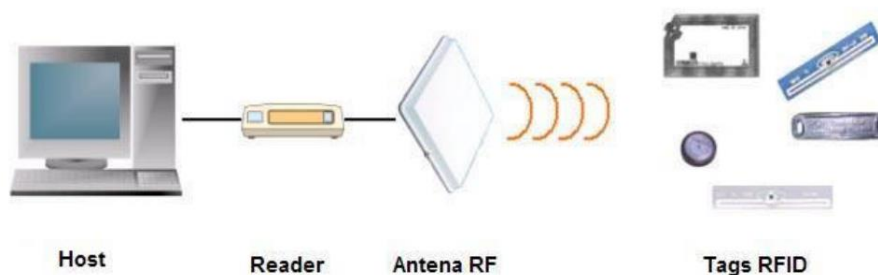


Figura 2. Esquema del funcionamiento y los elementos de un sistema RFID
Fuente: http://webpersonal.uma.es/de/fjgc/Recursos/RFID/RFID_Memoria.pdf

2.4 Arquitectura

El RFID es una tecnología que permite el almacenamiento y recuperación de datos basándose en la utilización de etiquetas donde se almacena la información, empleando diferentes bandas para utilizar las señales de radiofrecuencia. Los elementos básicos de todo sistema RFID son: una etiqueta o tag, un lector o interrogador, un ordenador que haga la función de “host” o controlador y una antena RFID.

2.4.1 Etiquetas

Las etiquetas de RFID están formadas simplemente por un transductor electromagnético, una antena impresa y un chip. Se adhieren a la superficie de objetos, animales o personas, y contienen la información que se extrae al consultarlas mediante el lector correspondiente.

El microchip es el encargado de almacenar los datos deseados mientras que la antena permite la comunicación entre el lector y el chip a través de señales de radiofrecuencia. El transductor permite la conversión de la energía recibida de las señales electromagnéticas emitidas por el lector. Las etiquetas están diseñadas para trabajar en la frecuencia que sea más adecuada al sistema, determinando también la distancia máxima de lectura y la capacidad de soportar el ambiente al cual será sometido. Podemos encontrar una gran variedad de etiquetas en función de su forma, frecuencia de trabajo o uso, como se observa en la figura 3.

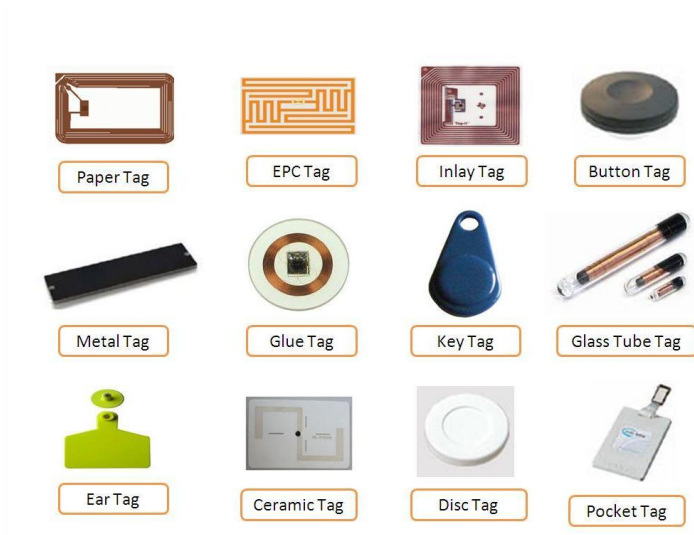


Figura 3. Ejemplos de etiquetas de RFID

Fuente: <https://www.wristbandhy.com/es/how-to-choose-passive-rfid-tags/>

2.4.1.1 El código EPC

El objetivo principal de la etiqueta es el envío del número identificador que contiene para que el lector pueda recibirlo y tratarlo en su base de datos. Este número identificativo, llamado “*Electronic Product Code*” o EPC, identifica al elemento etiquetado. Este código, regulado globalmente, tiene una longitud variable entre 96 y 496 bits. Los más comunes son los de 96 y 128 bits. Como podemos comprobar, pueden existir una gran cantidad de EPCs diferentes debido al gran número de combinaciones posibles de cada una de las partes del código.

La estructura del código EPC es la siguiente: en primer lugar, consta de 8 bits de cabecera, que especifica el formato y versión EPC utilizado por la etiqueta. A continuación, presenta un campo que contiene un número único asignado por la organización EPCGlobal a la empresa fabricante del producto. Este código es único e irreplicable para cada empresa. En tercer lugar, indica la clase de objeto de la que se trata. La empresa especifica de esta manera el tipo de producto etiquetado. Por último, presenta una serie de bits que identifican únicamente a cada producto. En la figura 4 podemos observar un ejemplo de código EPC de 96 bits, el más extendido [7].

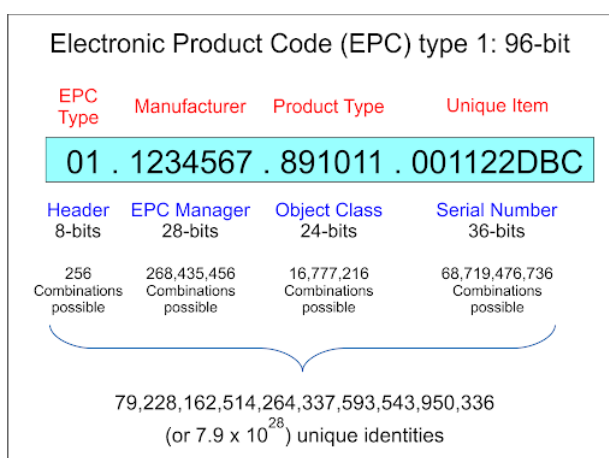


Figura 4. Estructura código EPC de 96 bits. Con esta longitud de código se alcanzan hasta 7.9e28 combinaciones diferentes.

Fuente: <http://iris.hdplus.es/dictionary/epc/>

2.4.1.2 Chip RFID

El chip RFID incrustado en la etiqueta se ocupa de contener la información que será enviada o modificada por el lector. Posee una memoria de unos cuantos Kb, dependiendo del tipo de etiqueta [8].

Está formado por:

- Un circuito analógico, que realiza la transferencia de datos y suministra la alimentación requerida.
- Un circuito digital, que incluye la lógica de control, del microprocesador y la de seguridad.
- Una memoria para almacenar los datos. Suele estar compuesta por una memoria ROM, que guarda los datos del funcionamiento del sistema y de la seguridad. Una memoria RAM, que permite el acceso temporal de datos. Y una memoria de programación no volátil (como una EEPROM), que se encarga de que los datos queden almacenados cuando el dispositivo está inactivo.
- Un registro de datos, que soporta los datos de entrada y salida después de la demodulación.

Podemos clasificar los diferentes de chips RFID dependiendo del tipo de memoria que dispongan.

1. Solo lectura: el código de identificación que contiene es único. Lo determina la empresa fabricante de la etiqueta. No puede ser modificado.
2. De lectura y escritura: El código identificador además de ser leído, puede ser modificado cuando se desee.
3. Anticolisión: se trata de etiquetas especiales que permiten que un lector identifique varias al mismo tiempo (habitualmente las etiquetas deben entrar una a una en la zona de cobertura del lector). Permite leer simultáneamente cientos de etiquetas.

2.4.1.3 Alimentación

Las etiquetas requieren alimentación para realizar la transmisión de datos al lector. Esta energía necesaria es baja, del orden de microwatios. Según la forma en la que estos circuitos obtienen la alimentación, podemos clasificar las etiquetas en tres tipos [8]:

1. Etiquetas pasivas: Las etiquetas pasivas no poseen ninguna fuente de alimentación, utilizan la energía de la señal enviada por el lector, mediante un acoplamiento inductivo. Esta señal induce una corriente eléctrica pequeña, suficiente para que el circuito integrado CMOS pueda generar y transmitir una respuesta. Este tipo de etiquetas suele tener distancias de uso comprendidas entre los 10 cm (ISO14443) y unos pocos metros (EPC e ISO 18000-6), en función de la frecuencia de funcionamiento y el diseño y tamaño de la antena.

Como no precisan de alimentación energética, el dispositivo fabricado puede resultar muy pequeño, pudiéndose incluir en una pegatina o insertarse bajo la piel (tags de baja frecuencia). Presentan una vida útil prácticamente ilimitada y un menor coste. Un ejemplo de este tipo de etiquetas es el que se encuentra en la figura 5.

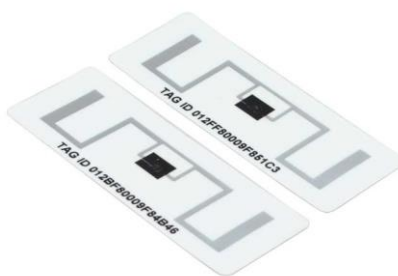


Figura 5. Ejemplo de etiqueta de RFID pasiva

Fuente: <https://www.fqingenieria.com/es/conocimiento/como-escoger-tag-rfid-adecuado-113>

2. Etiquetas activas: Las etiquetas activas poseen su propia fuente de alimentación, que utilizan para dar corriente a los circuitos integrados, encargados de propagar la señal de respuesta al lector. Al tener una fuente autónoma de energía, son capaces de transmitir señales más potentes, lo que las hace más eficientes en entornos de difícil transmisión, como en medios rodeados de agua o metal.

También presentan un mayor rango de lectura, llegando a cubrir distancias de decenas de metros. Suelen ser de mayor tamaño, como se observa en la figura 6, y precio, además de contar con una vida útil más corta.



Figura 6. Ejemplo de etiqueta de RFID activa

Fuente: <https://nextpoints.com/tipos-tag-rfid/>

3. Etiquetas semipasivas: son semejante a las activas, pero el tamaño de la batería utilizada es menor, ya que solamente actúa como fuente de alimentación y no para la transmisión de señales. Con este tipo de etiquetas, se consigue tener alimentado el chip sin la necesidad de fabricar un tag con una forma específica (figura 7) para captar la alimentación del lector como en el caso de las etiquetas pasivas. El tiempo de vida útil es mayor que el de las etiquetas activas, y la energía de la respuesta al lector mucho mayor que en las etiquetas pasivas.



Figura 7. Ejemplo de etiqueta de RFID semipasiva

Fuente: <https://nextpoints.com/tipos-tag-rfid/>

Los dos tipos de tags más frecuentemente utilizados son los pasivos y los activos. Para conocer las diferencias y propiedades de ambos tipos de etiquetas, podemos encontrar una comparación de sus principales características en la figura 8.

ETIQUETAS PASIVAS	ETIQUETAS ACTIVAS
<ul style="list-style-type: none"> • Alimentadas por la señal de RF del lector • Vida útil ilimitada • Menor alcance (0.1-10 m) • Pequeñas dimensiones • Afectadas por presencia de ruido • Baja velocidad de transmisión • Menor precio • Dependientes del lector 	<ul style="list-style-type: none"> • Alimentadas por batería • Vida útil limitada • Mayor alcance (10-100 m) • Grandes dimensiones • Inmunes al ruido • Alta velocidad de transmisión • Mayor precio • Autónomas

Figura 8. Comparación propiedades etiquetas activas y pasivas

Fuente: Elaboración propia

2.4.2 Lector

Los lectores RFID son los dispositivos electrónicos encargados de emitir y recibir señales de radiofrecuencia a través de sus antenas acopladas. Su función es interrogar a las etiquetas que se encuentren en el rango de trabajo oportuno, alimentándolas en caso de que se traten de tags pasivos. Pueden realizar diferentes acciones sobre las etiquetas como consultar su código identificador, capturar datos almacenados en ellas, sobrescribir en su memoria o incluso deshabilitar el tag [9].

También son los encargados del flujo de información que existe entre las etiquetas y el sistema central, a través del “*middleware*”. Pueden modificar la base de datos mediante acciones como filtrar, procesar o agregar los datos de las etiquetas leídas.

El funcionamiento del lector se basa en la comunicación a través de ondas electromagnéticas mediante la antena que incluye, la que permite el envío de información digital codificada. El circuito analógico receptor situado en la etiqueta, es capaz de detectar la señal enviada mediante su propia antena, descodificando la información y respondiendo al lector utilizando la misma antena para enviar la señal, que será mucho más débil que la del lector. De esta manera podemos comprobar como ambas antenas, la del lector y la de las etiquetas, se utilizan tanto en el envío como en la recepción de datos.

Por lo tanto, las principales funciones del lector son las siguientes:

- Suministrar la energía necesaria a las etiquetas pasivas para poder comunicarse con ellas.
- Realizar procesos de anticolisión, filtrado y manejo del lector.
- Actuar como interfaz entre la etiqueta, la base de datos del sistema y el procesado de la información.
- Actuar según los comandos de software de la aplicación.
- Interrogar a las etiquetas y almacenar la información recibida en las respuestas.
- Conversión de ondas de radiofrecuencia en señales digitales.

- Transmisión de los datos recibidos a otros dispositivos por conexiones inalámbricas o de cableado.
- Soporte de diferentes protocolos (EPC, ISO...).

2.4.2.1 Componentes

Un lector de RFID consta de los siguientes componentes (figura 9) [10]:

1. Antena: es el elemento más sensible de todo el sistema ya que es el encargado del envío de las señales de RF a las etiquetas y de la recepción de las señales de baja potencia que irradian las antenas de las etiquetas. Se tratará con más profundidad en el siguiente apartado.
2. Módulo de radiofrecuencia: está formado por un transmisor y un receptor, encargados de generar y recibir las señales de radiofrecuencia que permiten la comunicación con las etiquetas. Además, debe generar la señal que alimenta a los tags en el caso de que sean pasivos, modular la transmisión de la señal enviada a las etiquetas y demodular las señales recibidas de las etiquetas.
3. Transmisor: es el encargado de generar la señal de radiofrecuencia y modularla para que contenga la información que requiere la comunicación con el tag.
4. Receptor: es el encargado de demodular la señal recibida y transmitir la información digital, contenida en la señal modulada, al lector.
5. Unidad de control: está formada por un microprocesador y en algunas ocasiones dispone de un circuito ASIC (circuito integrado de aplicación específica), de apoyo al micro. Se encarga de codificar y decodificar los datos enviados y recibidos, comprobar la veracidad de éstos y almacenarlos. También se encarga de activar las etiquetas, detectar y corregir errores, gestionar el proceso de multilectura por tal de evitar colisiones, y comunicarse con el sistema de almacenamiento de la información.

Los principales métodos de control de errores son los bits de paridad LRC (comprobación de redundancia longitudinal) y CRC (comprobación de redundancia cíclica). La cantidad de etiquetas que un lector puede identificar en un tiempo determinado depende del protocolo utilizado y de la frecuencia de trabajo, de manera que, a mayor frecuencia, mayor cantidad de datos se pueden leer por unidad de tiempo.

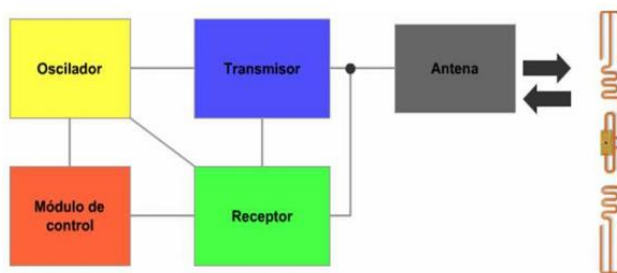


Figura 9. Componentes de un lector de RFID

Fuente: Diseño e implementación de un sistema prototipo para la identificación animal bovina con RFID. Aníbal Galárraga Sosa. 2009

2.4.2.2 Tipos de lectores

De la misma manera que ocurría con las etiquetas, podemos clasificar los distintos tipos de lectores en función de diferentes parámetros. En primer lugar, según su movilidad [8]:

- Lector fijo: se colocan en lugares fijos, como en la cercanía de una puerta o sobre un pedestal. Son utilizados en controles de acceso o sistemas antirrobo. Requiere la instalación de las antenas para escanear los tags que pasan por su campo de funcionamiento.
- Lector de mano: se utilizan en puntos de control, identificación, terminales o puntos de servicio, para la lectura y escritura de etiquetas. Incorporan el lector y la antena en el mismo “*hardware*”.
- Lector móvil: permite mayor movilidad al escaneo de las etiquetas. También incluye antena y lector.

También pueden ser clasificados en función de su método de funcionamiento:

- Escaneando su zona de cobertura de forma continua. Se utiliza en casos en los que se espera que pasen etiquetas continuamente.
- Escaneando su zona de cobertura periódicamente. El lector se activa cada un cierto periodo de tiempo determinado.
- Escaneando su zona de cobertura de forma puntual. Si un sensor de movimiento detecta un objeto, el lector entra en funcionamiento.

2.4.2.3 Funcionamiento

La potencia recibida por el lector que llega desde las etiquetas suele ser muy débil, mucho menor que la emitida por el lector. Por ello es importante asegurar una correcta comunicación entre etiqueta y “*reader*”. Principalmente existen dos técnicas para ello, acoplamiento en campo lejano (mediante “*backscatter*” o reflexión) y acoplamiento inductivo (mediante métodos de modulación de carga). El primer caso es el utilizado en sistemas de UHF y microondas, mientras que el segundo se utiliza en sistemas de LF o HF.

El funcionamiento básico del acoplamiento capacitivo (ver Figura 10) consiste en que el lector emite una señal de radiofrecuencia que es recibida, modulada, usada para alimentar a su chip (si fuera el caso) y reflejada por el/los tags que alcance. Esta señal reflejada incide en el lector completando así la identificación.

ACOPLAMIENTO CAPACITIVO (BACKSCATTER)

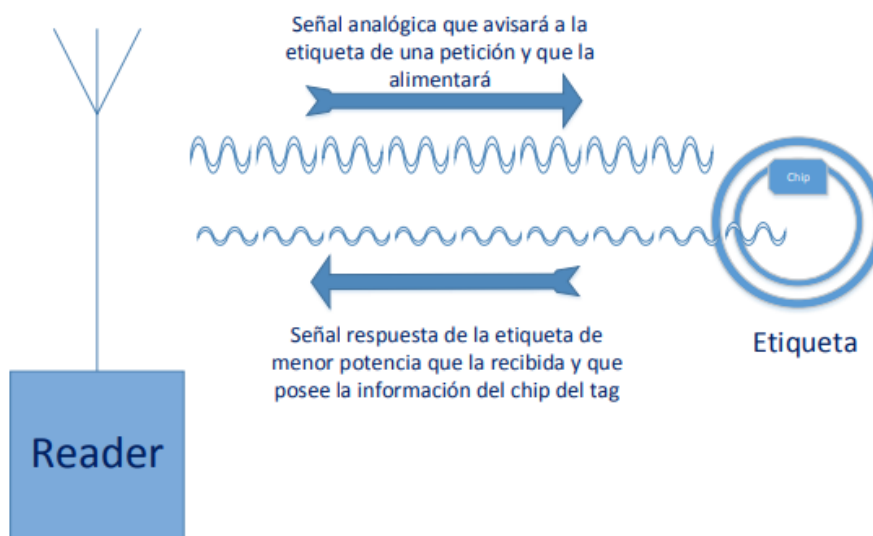


Figura 10. Acoplamiento en campo lejano en RFID

Fuente: Análisis y prueba de un sistema en tecnología de identificación por radiofrecuencia. José María García Barceló. 2016

El acoplamiento inductivo (ver Figura 11) se basa en la inducción de una corriente eléctrica en la antena de la etiqueta gracias al campo magnético producido por el lector que ha sido creado cuando una corriente circulaba por él. Además de alimentar a la antena, la impedancia de ésta es conmutada por el tag para la creación de una modulación que será la responsable de la transmisión de los datos. Notar que en esta última técnica es necesario que las etiquetas estén más cerca del “reader” con el otro tipo de acoplamiento, ya que el campo cercano se atenúa más rápidamente que las componentes radiadas o de campo lejano.

ACOPLAMIENTO INDUCTIVO (MODULACIÓN DE CARGA)

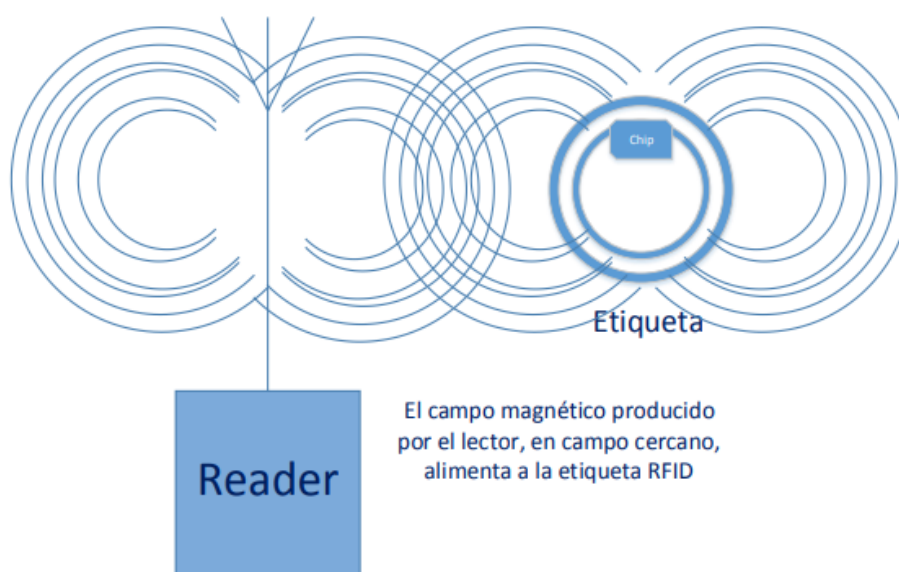


Figura 11. Acoplamiento inductivo en RFID

Fuente: Análisis y prueba de un sistema en tecnología de identificación por radiofrecuencia. José María García Barceló. 2016

2.4.3 Antenas

Las antenas son los elementos que se encargan de realizar la comunicación inalámbrica entre el lector y la etiqueta. Pueden tener multitud de diseños, con diferentes formas y tamaños, lo cual es de gran importancia para su funcionamiento.

La principal característica a la hora de diseñar la antena es la frecuencia de operación a la que trabaja el sistema. No obstante, existen otros parámetros importantes como la impedancia, la potencia máxima emitida, la ganancia o el tipo de polarización (lineal o circular). Estos parámetros son los que caracterizan el campo de radiofrecuencia generado por la antena, además de la eficiencia de la antena y el tipo de acoplamiento.

El principal parámetro a tener en cuenta al elegir una antena es el área de cobertura requerida. Es necesario asegurar que se alcanza la distancia máxima que la aplicación requiere, por tal de evitar lecturas no válidas, que puedan producir errores en el sistema.

Un rasgo importante de las antenas es el patrón de radiación, es decir, por dónde y con qué potencia emiten la señal. Esta característica es importante a la hora de determinar la zona de cobertura que genera la antena. Normalmente las antenas pueden ser directivas, que envían y reciben señal en una zona determinada, u omnidireccionales, que emiten y reciben en todas las direcciones. En la figura 12 se puede observar la comparación gráfica del campo generado por ambos patrones de radiación [11].

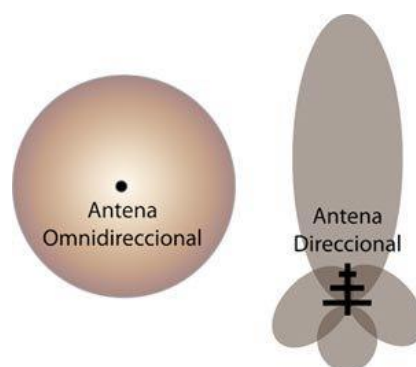


Figura 12. Comparativo diagrama de radiación antenas omnidireccional y direccional
Fuente: <https://todosobrerredes503.wordpress.com/redes-inalambricas/antenas-direccionales-y-omnidireccionales/>

Otro factor que caracteriza a las antenas son la ganancia y la anchura del haz, dos especificaciones relativas a la parte eléctrica de la antena y estrechamente relacionadas. Una ganancia mayor crea un área de cobertura más estrecha, pero la distancia de lectura será mayor, es decir, la antena será más direccional. En contraposición, una menor ganancia crea un área de cobertura mayor, pero una distancia de lectura menor, es decir, la antena será más omnidireccional (representado gráficamente en la figura 13). La anchura del haz y la ganancia son inversamente proporcionales.

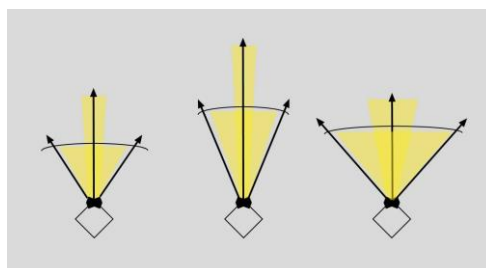


Figura 13. Comparativo ganancia y ancho de haz de una antena
Fuente: <https://www.fqingenieria.com/es/conocimiento/guia-para-escoger-la-antena-rfid-uhf-mas-adecuada-114>

Las antenas que incorporan los “*readers*” de RFID se encargan principalmente de capturar las señales analógicas emitidas por las etiquetas y convertirlas en señales digitales. También emiten señales hacia los tags para comunicarse con ellos e incluso alimentarlos. En definitiva, permiten la comunicación entre el lector y las etiquetas. Las características mencionadas anteriormente son las que determinarán que tipo de antena incorpora el lector, y por tanto que radio, polarización o frecuencia tendrán las señales generadas.

Las antenas de los tags se encargan de enviar el contenido almacenado en su memoria, generalmente un número identificador, al lector. En el caso de las etiquetas pasivas, además se encarga de recolectar la energía procedente del lector y, así, proporcionar la alimentación necesaria al microchip. El tipo de antena dependerá de la aplicación. Los materiales de fabricación son diversos y pueden ser impresos, grabados o estampados con tinta conductora, etc. En algunos casos es recomendable utilizar un array de dos antenas en lugar de una sola para evitar posibles zonas de no conexión, especialmente en las antenas de los lectores.

2.5 Frecuencias

Para garantizar la comunicación entre los diferentes dispositivos RFID presentados anteriormente, es necesario que estén sintonizados a la misma frecuencia de funcionamiento.

Podemos clasificar las frecuencias de funcionamiento utilizadas actualmente en cuatro tipos:

1. *Low Frequency (LF)*: baja frecuencia, en esta banda el RFID trabaja desde los 125 a los 134 kHz.
2. *High Frequency (HF)*: alta frecuencia, en esta banda el RFID trabaja a 13.56 MHz. También hay sistemas que trabajan entre 5 y 7 MHz, pero corresponde a una banda de frecuencias mucho menos utilizada.
3. *Ultra High Frequency (UHF)*: en esta banda de frecuencias, el RFID trabaja entre 860 y 960 MHz. En esta franja trabaja el lector en el que se basa nuestro proyecto, de manera que la estudiaremos con mayor detalle posteriormente.
4. *Microwaves*: la tecnología RFID en esta banda trabaja a 2.45 GHz. También existe una banda menos utilizada entre 5.2 y 5.8 GHz.

El uso de una banda de frecuencias u otra, supone una gran diferencia en el funcionamiento del sistema. La frecuencia de trabajo caracteriza la distancia, velocidad de lectura, diseño de antenas, etc. y es un parámetro muy importante a la hora del desarrollo de nuestra aplicación.

No existe ningún organismo que regule completamente las diferentes frecuencias a las que ha de ceñirse la tecnología RFID a nivel mundial. Son los países los que regulan las frecuencias en función de las corporaciones de cada estado. En el caso que nos ocupa en nuestro proyecto, UHF, existen diferentes estándares que regulan su utilización, como FCC, ERO, CEPT, ETSI, DOC, MPHPT, entre otras.

Por lo tanto, podemos trabajar en cualquiera de las cuatro frecuencias diferentes anteriormente presentadas. A continuación, se detalla el funcionamiento y las características principales de cada uno, en función de diferentes parámetros como la capacidad de almacenamiento, la velocidad, el tiempo de lectura el área de cobertura o las posibles aplicaciones [12].

2.5.1 Low Frequency (125 KHz)

Se considera baja frecuencias, aquellas que van desde los 30 KHz, hasta los 300 kHz. La tecnología RFID dentro de ese rango, se encuentra entre los 125 KHz y los 134 KHz.

En los sistemas de RFID de bajas frecuencias, es común utilizar etiquetas pasivas, que utilizan el funcionamiento inductivo para la transmisión de datos. Son especialmente útiles ya que penetran de mejor manera en metales y líquidos. Es por ello por lo que se suelen utilizar en entornos industriales, adheridas a alimentos y en productos con alto contenido de agua.

La memoria de los tags pasivos suele ser baja, de uno 64 bits, pese a que algunas etiquetas pueden almacenar hasta 2 kbits.

La velocidad y tiempo de lectura también son bajos (entre 200 y 1000 bits por segundo), ya que la frecuencia de funcionamiento y la energía transmitida a la etiqueta no es muy elevada.

Son muy sensibles a la distancia, los sistemas de RFID de bajas frecuencias tienen rangos de cobertura normalmente de 10 cm, pudiendo alcanzar como máximo 1 m en algunos casos [13].

Su uso está extendido en aplicaciones donde no se requiere una gran cantidad de datos de memoria ni una alta velocidad de transmisión. Ejemplo de ello son sistemas de control de accesos, gestión de inventario o identificación de ganado.

El precio de las etiquetas de LF es relativamente alto en comparación con el resto de las opciones, rondando el euro. Su tamaño también es mayor, pero resultan más resistentes a interferencias.

2.5.2 High Frequency (13.56 MHz)

Se considera en el espectro de frecuencias, que las frecuencias altas son aquellas que se encuentran entre los 3 y los 30 MHz. El RFID en esta banda trabaja a 13.56 MHz. Otra banda menos utilizada comprende entre 5 y 7 MHz.

Es la frecuencia más utilizada en los sistemas de RFID actuales, debido a su elevada capacidad de almacenamiento y una velocidad de transmisión alta. Requiere una mayor potencia de señal que las de baja frecuencia.

La mayoría de los sistemas utilizan etiquetas pasivas, lo cual permite una mayor vida útil de los sistemas, la capacidad de utilizarlos en entornos desfavorables y un coste menor, teniendo etiquetas por un precio de unos cincuenta céntimos.

Al contrario que sucedía con las de baja frecuencia, las HF se ven bastante afectadas por los metales. Sin embargo, puede atravesar la mayoría del resto de materiales. Pueden funcionar a distancias de entre diez centímetros, es el caso de las ISO 14443; y hasta un rango algo superior a un metro, como las ISO 15693. Actualmente este tipo de tarjetas han sido adoptadas por el estándar NFC y pueden ser leídas desde el móvil, popularizándose por ser utilizadas en los sistemas de pago “*contactless*” [14].

La memoria típica de las etiquetas pasivas de alta frecuencia es de entre 512 y 8k bits. Se trata de una memoria mucho más elevada que la de los sistemas de baja frecuencia, ya que la inductancia del campo generado permite una alimentación de las etiquetas mucho más elevada a la hora de la transmisión de datos.

La velocidad común de estos sistemas suele ser de unos 25 Kbps, variando en el caso de introducir algoritmos de comprobación de bits que eviten errores en la transferencia de datos. Sin embargo, algunos sistemas pueden llegar a velocidades de hasta 100 Kbps. Permiten leer unas cuarenta etiquetas por segundo en equipos de alta velocidad.

Las etiquetas que trabajan en esta frecuencia se utilizan mayoritariamente en tarjetas inteligentes, por ejemplo, tarjetas bancarias o de acceso. Permite una conexión con el lector sin contacto, a corta distancia y alta potencia, asegurando la encriptación de los datos en la comunicación con el “*reader*”. La alta tasa de velocidad permite realizar transacciones financieras seguras. También se utilizan en documentación, como carnés de identidad o pasaportes; controles de acceso, trazabilidad o gestión de suministros.

2.5.3 Ultra High Frequency (433 MHz, 860 MHz, 928 MHz)

La banda de UHF está comprendida entre los 300 MHz y los 3 GHz. En este rango, la tecnología RFID trabaja entre los 860 y los 960 MHz, según el estándar UHF Gen 2. Otra frecuencia menos extendida es la de 433 MHz, banda dedicada a la radio industrial, científica y médica. La frecuencia de trabajo del RFID en UHF varía en función de la región, ya que, al estar legislada de manera diferente en cada país, no puede ser usada de forma global. Al tratarse esta frecuencia la que nos ocupa en el proyecto, veremos posteriormente en detalle las diferentes bandas utilizadas en diversos países.

La banda UHF se encuentra regulada por un estándar global único: el estándar EPCglobal Gen2 (ISO 18000-6C). Estos sistemas se basan en la propagación de ondas electromagnéticas, que permiten la comunicación y alimentación, en caso de que sea necesario, de las etiquetas. Esto los diferencia de los sistemas de baja frecuencia, los cuales funcionan mediante inducción electromagnética.

En esta banda de frecuencias podemos encontrar etiquetas tanto pasivas como activas. La memoria de los tags se encuentra entre 32 y 4k bits. La velocidad de transmisión típica es de 28 kbps, aunque existen aplicaciones donde se puede alcanzar una mayor velocidad.

Con dicha velocidad, se pueden leer unas cien etiquetas por segundo, lo cual convierte al UHF en una tecnología muy rápida y eficaz. El alcance en caso de etiquetas pasivas ronda los cuatro metros, mientras que con etiquetas activas puede llegar hasta diez o doce metros de rango.

En estas frecuencias, las señales se ven gravemente afectadas por los metales y líquidos, por lo que no es recomendable la implantación de sistemas de UHF en entornos metálicos o con objetos que contengan agua. Los metales reflejan las señales, provocando errores en la lectura, mientras que los líquidos absorben las señales a estas frecuencias introduciendo elevadas atenuaciones.

La cobertura de los sistemas de UHF RFID está muy influenciada por las limitaciones que los distintos países imponen a la potencia máxima permitida. Por ejemplo, en Estados Unidos la cobertura es ligeramente mayor ya que se permiten potencias de hasta cuatro vatios EIRP (“*Effective Isotropic Radiated Power*”), mientras que en Europa la máxima potencia permitida es de 2 vatios ERP (“*Effective Radiated Power*”), que es equivalente a 3,2 vatios EIRP. Compararemos los diferentes criterios que regulan esta tecnología en los diferentes países posteriormente [15].

Son muy utilizados en aplicaciones con una alta velocidad de comunicación y capacidad de almacenamiento. La principal aplicación de estos sistemas es la logística, aunque también es utilizada en la detección de vehículos en movimiento, control de personas u objetos y aplicaciones de seguridad.

En el estándar ISO/IEC 18000-6 se encuentran los parámetros para la comunicación de las etiquetas pasivas que trabajan a la frecuencia UHF de la banda 860 MHz a la 960 MHz y en el estándar ISO/IEC 18000-7 para la banda de 433 MHz [16].

2.5.3.1 Regulación Global de Frecuencias para UHF RFID

Cuando apareció el UHF RFID, las principales instituciones encargadas del control del espectro se unieron para incluir los rangos de frecuencias de uso y los elementos regulatorios en la normativa. Era necesario una actualización de las normas para evitar que quedaran desfasadas. La Organización Internacional de Normalización (ISO), la Comisión Electrónica Internacional (IEC), ASTM Internacional y EPC Global se unieron para garantizar una amplia adaptabilidad en todo el mundo.

Los rangos de frecuencia elegidos fueron los que se encontraban en la banda ISM (“*Industrial Scientific and Medical*”). Hoy en día, las frecuencias RFID UHF varían en cada país en función las regulaciones de cada región. Cada estado ha adoptado la frecuencia que mejor se ajustaba a sus reglamentaciones vigentes.

Los estándares de UHF RFID EPC Class 1 Gen 2 y ISO 18000-6C, adaptaron principalmente dos bandas de frecuencias. La conocida como banda americana, situada entre los 902 y los 928 MHz; y la banda europea, entre 865 y 868 MHz. El resto de los países del mundo adoptaron bandas ligeramente diferentes dentro del espectro, lo que provoca que no haya una normativa única.

Es por tanto importante conocer la normativa del país en el que va a trabajar el sistema RFID, ya que, en caso de utilizarlo en un país con unas leyes diferentes, no cumpliría la normativa y podría recibir una multa considerable. También es importante diseñar los lectores y tags para que funcionen correctamente en la banda deseada. Como veremos en la parte práctica, los tags están diseñados para funcionar en un rango de frecuencias, y podrían tener un mal funcionamiento en caso de trabajar fuera de él.

A continuación, en la tabla de la figura 14 se presentan las regulaciones de algunos de los principales países, en los cuales puede trabajar el lector que desarrolla la parte práctica del trabajo. Es importante destacar que las normativas referentes al espectro de radiofrecuencias se encuentran en continuas reformas y modificaciones para liberar o trasladar frecuencias, es por ello por lo que la tabla incluye los datos válidos a la fecha de realización del trabajo.

Región	Banda de frecuencias	Potencia máxima	Unidad
Europa	865.6-867.6 MHz	2 W	ERP
EE. UU.	902-928 MHz	4 W	EIRP
Corea	917-920.8 MHz	4 W	EIRP
Japón	916.7-920.9 MHz	4 W	EIRP
China	920.5-924.5 MHz	2 W	ERP
Australia	920-926 MHz	4 W	EIRP
Nueva Zelanda	864-868 MHz	6 W	EIRP
	920-928 MHz	6 W	EIRP
India	865-867 MHz	4 W	ERP

Brasil	902-907.5 MHz	4 W	EIRP
	915-928 MHz	4 W	EIRP
Canadá	902-928 MHz	4 W	ERP
Israel	915-917 MHz	2 W	EIRP
Sudáfrica	865.5-867.6 MHz	2 W	ERP
	915.4-919 MHz	4 W	EIRP
Emiratos Árabes Unidos	865.6-867.6 MHz	2 W	ERP

Figura 14. Tabla comparativa de la normativa de UHF RFID en los principales países del mundo
Fuente: https://www.gs1.org/docs/epc/uhf_regulations.pdf

Es importante la diferencia de unidad a la hora de calcular la potencia máxima de emisión permitida. En algunas regiones la unidad de medida es EIRP, es decir, potencia radiada efectiva relativa a una antena isotrópica (PIRE en castellano). Mientras que ERP significa potencia radiada efectiva relativa a una antena dipolo. Generalmente, los 4 W EIRP suponen una mayor potencia permitida de emisión por parte del lector en comparación con los 2 W ERP. Existe una relación entre ambas, $EIRP=ERP \cdot G$, donde G es la ganancia de la antena. Notar que en el caso de ERP en normativas se especifica normalmente como antena del lector una antena dipolo con una ganancia de 1.65 en lineal o 2.16 dB. Por tanto, siguiendo con el ejemplo anterior, 2W ERP equivalen a 3.4 W EIRP. En definitiva, no existe tanta diferencia entre los límites en diferentes regulaciones.

También existen diferentes técnicas de comunicación marcadas en la regulación de cada país. En Europa, Sudáfrica y Emiratos Árabes, se utiliza el estándar ETSI 302 208, mientras que en el resto de los países se utiliza la técnica FHSS. El espectro ensanchado por salto de frecuencia (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) es una técnica de modulación en espectro ensanchado en el que la señal se emite sobre una serie de frecuencias aparentemente aleatorias, saltando de frecuencia en frecuencia sincrónicamente con el transmisor [17]. Mientras que la normativa FCC (USA) utiliza FHSS, la europea utiliza el sistema “*Listen-Before-Talk*” (LBT) que monitoriza la potencia que se está enviando por un canal antes de utilizarlo, para evitar colisiones con otros lectores que puedan estar enviando en ese momento.

2.5.4 *Microwaves (2,45 GHz, 5,8GHz)*

Esta banda comprende desde los 300 MHz hasta los 300 GHz. La tecnología RFID trabaja en la frecuencia de 2.45 GHz. Otra banda menos utilizada en RFID es la de 5.2 a 5.8 GHz.

Las etiquetas de microondas pueden ser pasivas, semipasivas o activas. Las etiquetas pasivas suelen ser de menor tamaño que las de UHF y un rango de lectura similar, unos cinco metros. En el caso de las semipasivas, pueden llegar hasta los treinta metros, mientras que las etiquetas activas en las frecuencias de microondas pueden llegar a tener un alcance de hasta cien metros.

En este rango de frecuencias no existen tantas limitaciones en la normativa como sucedía con las de UHF, sin embargo, esto provoca que los sistemas encontrarán multitud de interferencias de otros dispositivos que trabajarán a las mismas frecuencias ya que no necesitan licencia.

Las etiquetas de los sistemas de microondas pueden almacenar desde los 128 bits hasta los 512kbits, divididos en bloques para direccionar los datos. La velocidad y el tiempo de lectura dependen de la etiqueta, aunque es elevada en todos los casos. La velocidad típica suele ser de unos 100 Kbps (normalmente un poco inferior), llegando a alcanzar algunos dispositivos hasta 1 Mbps.

Los sistemas que trabajan en esta banda tienen un ancho de banda más amplio en comparación con las otras bandas. Al igual que los de UHF, funcionan mediante ondas electromagnéticas. Esto origina que sean sistemas con una velocidad de lectura y transmisión muy altas. En contrapartida, son sistemas muy sensibles a los líquidos y metales.

Se utiliza generalmente para la identificación y el reconocimiento remotos de objetos que se mueven rápidamente. Por ejemplo, comunicaciones de proximidad y control industrial, logística, identificación y gestión del transporte ferroviario o sistemas de teletacs en autopistas [18].

2.6 Codificación y Modulación

La comunicación entre el lector y la etiqueta en la tecnología RFID requiere de un lector, que codifica y modula la señal; el canal de transmisión, en este caso el aire; y una etiqueta, que demodula y decodifica la información. El proceso de codificación dota a la información de protección contra interferencias y modificaciones externas.

2.6.1 Codificación

La codificación es aquella operación que tiene lugar para enviar datos de un lugar a otro, procesarlos y obtener resultados a partir de ellos. Para comprenderlos, estudiaremos la forma en la que se representan los valores binarios en función de la codificación escogida. Los sistemas de RFID utilizan principalmente los siguientes tipos de codificación que se ven representados en la figura 15[19]:

- Código NRZ (“No return to zero”): en esta codificación se utiliza un cero para representar señales bajas y un uno para las altas. Es la codificación más simple y menos robusta. Se utiliza principalmente en las modulaciones PSK o FSK.
- Código Unipolar RZ: en esta codificación, el cero se representa con una señal baja, mientras que el uno consta de la mitad del periodo con una señal alta y la segunda mitad baja.
- Código DBP: en este caso, se representa el cero con una transición alto-bajo o bajo-alto en mitad del periodo, independientemente del estado en el que se encuentre. El uno lógico, no presenta ninguna transición. El nivel de señal se invierte siempre al inicio de cada periodo.
- Código Miller: el cero se representa manteniendo el mismo nivel si el bit anterior es un uno o cambiando de nivel si le precede un cero. El uno se representa con una transición a mitad del periodo.
- Código Manchester: en esta codificación, el cero se representa con una transición bajo-alto a mitad de periodo, mientras que el uno se representa con una transición alto-bajo a mitad de periodo. Cuando se tienen bits iguales y consecutivos se produce una transición al inicio del segundo bit.

- Código pulso-pausa: Un cero representa una pausa de duración igual a dos veces un tiempo determinado. El uno corresponde a una pausa de duración t .
- Código diferencial: en este caso, el cero se representa permaneciendo en el mismo nivel binario, mientras que para representar un uno se produce un cambio al nivel de señal contrario al que se encuentre.

Según el sistema RFID implantado (tipo de etiqueta, frecuencia de funcionamiento, etc.) un tipo de codificación u otro será más eficiente para la transmisión de información.

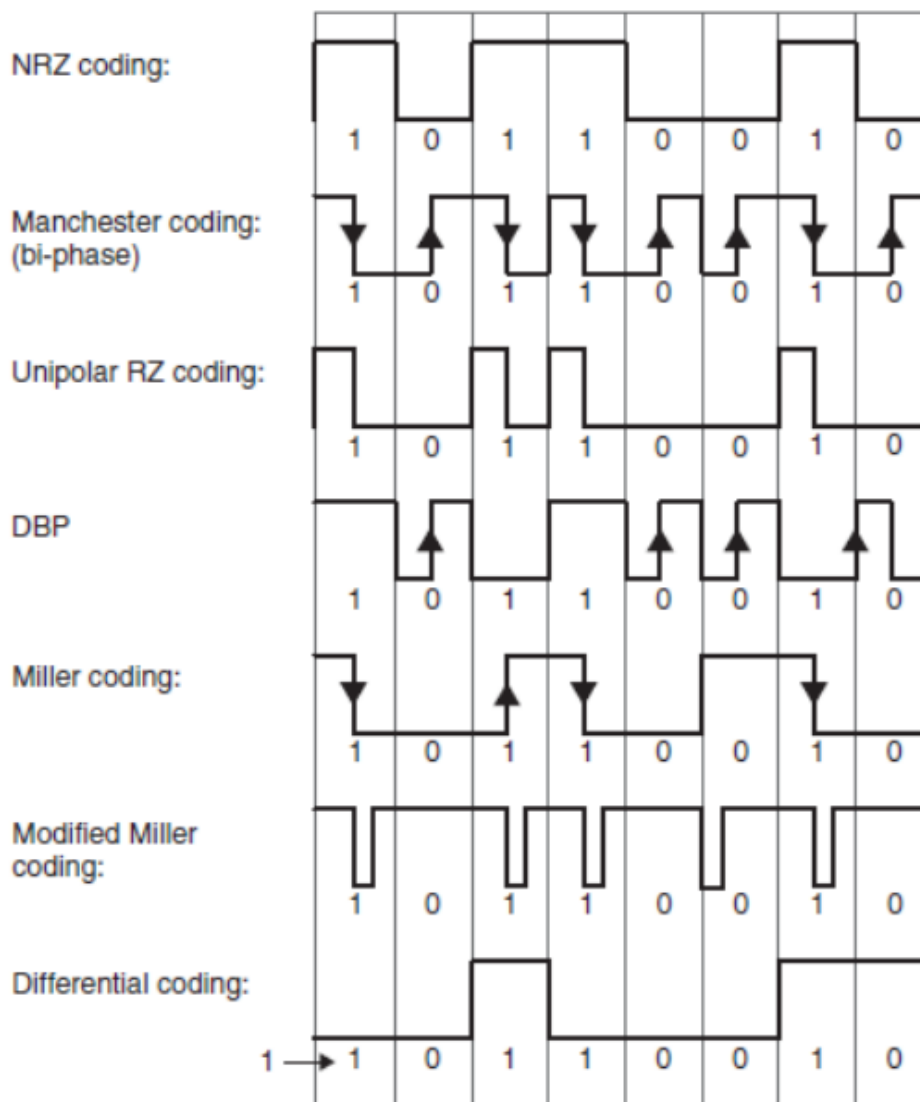


Figura 15. Codificaciones más utilizadas en la tecnología RFID

Fuente: Análisis y prueba de un sistema en tecnología de identificación por radiofrecuencia. José María García Barceló. 2016

2.6.2 Modulación

El proceso de modulación de una señal de alta frecuencia consiste en modular sus parámetros, ya sea amplitud, frecuencia o fase, para transmitir la información a través del canal de transmisión, en el caso del RFID, el aire.

En recepción, ya sea en la etiqueta o en el lector, se requiere demodular la señal que se recibe para convertirla a banda base y aplicar posteriormente el proceso de decodificación. De esta manera se reconstruye finalmente la señal, obteniendo los datos que contiene.

Las modulaciones analógicas más frecuentemente utilizadas son las que, cómo se comentaba anteriormente, modulan la amplitud, frecuencia o fase de la señal. La modulación de la amplitud (AM), que modifica la amplitud de la señal portadora. La modulación en frecuencia (FM), que modifica su frecuencia. Y finalmente la modulación de la fase (PM), que modifica la fase.

Para la tecnología RFID, las técnicas de modulación utilizadas se basan en las modulaciones digitales por desplazamiento de amplitud ASK (*“Amplitude Shift Keying”*), por desplazamiento de frecuencia FSK (*“Frequency Shift Keying”*) y por desplazamiento de fase PSK (*“Phase Shift Keying”*), además de la modulación con subportadora. Podemos verlas representadas en la figura 16 [20].

- **ASK:** en la modulación por desplazamiento de amplitud, se representa el uno dejando pasar la señal original, sin modificar. Mientras que el cero se representa anulando por completo la señal, es decir, no se envía ninguna señal durante un periodo.
- **FSK:** en la modulación por desplazamiento de frecuencia, la señal moduladora solo varía entre dos valores de frecuencia discretos, donde cada uno de los niveles binarios, el cero y el uno, les corresponde una frecuencia diferente. De esta manera, cuando se transmite un cero lógico se utiliza una frecuencia, mientras que cuando se envía un uno, la frecuencia de la señal es otra.
- **PSK:** en la modulación por desplazamiento de fase, los ceros y unos se representan mediante una diferencia en la fase de la señal portadora, normalmente los dos niveles se representan mediante 0° y 180° . Matemáticamente, este cambio de fase corresponde con multiplicar por uno o menos uno la señal, según corresponda.

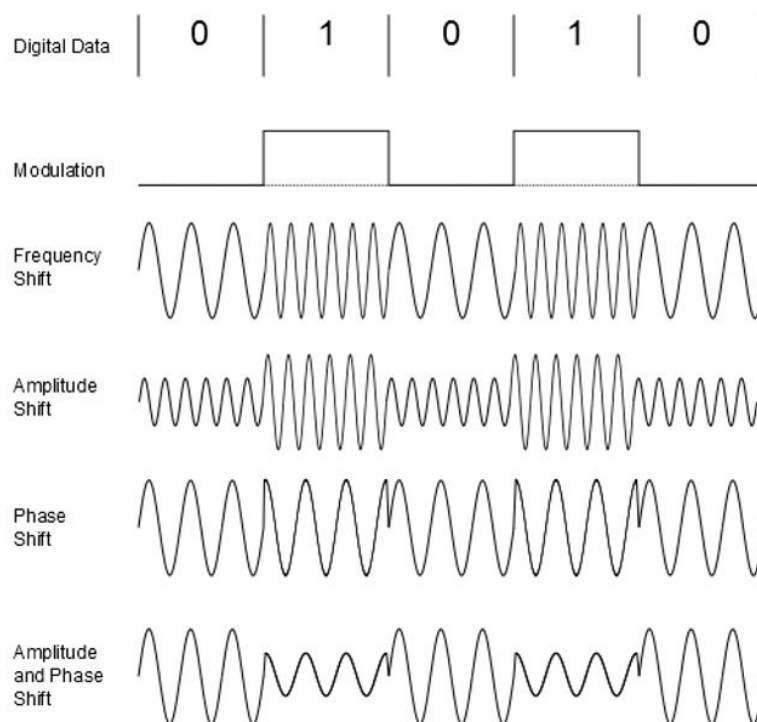


Figura 16. Técnicas de modulación más utilizadas por sistemas RFID
Fuente: <https://www.5gtechnologyworld.com/digital-modulation-basics-part-1/>

2.7 Aplicaciones

Los sistemas de RFID están cada vez más extendidos a nivel mundial, de hecho, su uso se ha visto aumentado de forma exponencial durante los últimos años. Actualmente esta tecnología se encuentra en una gran variedad de sectores, como la logística, la alimentación, la salud, la ganadería o el control de accesos, ya que aporta una recogida y almacenado de datos de forma rápida y segura.

Presenta numerosas ventajas, como el aumento de la productividad, la reducción de costes, la detección de falsificaciones o la mayor seguridad de los productos que se identifican con dicho sistema. En los apartados anteriores se han comentado algunas de las aplicaciones de estos sistemas, a continuación, se presenta un resumen de ellas [21].

- Control de accesos: se trata de una de las principales aplicaciones del RFID. Permite controlar el acceso a recintos o instalaciones mediante un elemento identificador (generalmente una tarjeta), que contiene la información de quien solicita el acceso. Por ejemplo, se puede permitir el acceso únicamente si la persona ha comprado la entrada o si se trata de un empleado con los permisos necesarios.

- Trazabilidad en la cadena de suministros: gracias al control automático del RFID, el movimiento de mercancías se simplifica y optimiza con absoluta fiabilidad. En nuestro mundo globalizado, los movimientos de bienes son complejos y están compuestos por una multitud de procesos de diferentes agentes. Por ejemplo, la empresa proveedora, la empresa distribuidora, la empresa receptora, los diferentes agentes de aduanas, las empresas de transporte, etc. Está claro que todos estos procesos deben coordinarse para optimizar el tiempo y los recursos. Al mismo tiempo, se debe salvaguardar la seguridad de los bienes y los consumidores. En este escenario, es donde la gestión automática por RFID destaca por sus posibilidades y beneficios.

- Trazabilidad de productos comerciales: permiten el etiquetado e identificación de los productos comerciales. En primer lugar, reducen la cantidad de productos perdidos o robados, ya que las etiquetas de RFID permite detectar si el producto sale del recinto de venta, significando menos pérdidas económicas. En segundo lugar, evitan el desabastecimiento (falta de stock) ya que proporciona información sobre el inventario en tiempo real. Se consigue una mayor ganancia económica, ya que se es consciente de las existencias de los productos para satisfacer la demanda.

Finalmente, permite realizar un inventario mucho más rápido, ya que se pueden detectar los tags identificadores con lectores móviles desde cierta distancia y en cualquier posición. De esta manera, con un solo barrido con el lector, permite dejar al personal libre de tareas repetitivas y manuales, dejando más tiempo de trabajo disponible a los trabajadores y significando menos errores humanos. También facilita el escaneo de los productos en el momento del cobro. En este sentido, se trata de una evolución del clásico código de barras.

- Identificación y seguimiento de animales: la cría de animales y las mascotas son dos ejemplos en los que los animales se etiquetan con chips RFID. Estos chips, y a veces etiquetas inteligentes, contienen la información sobre el animal

y, además, esta información se puede actualizar reescribiendo el chip RFID. Esta característica es muy importante por tal de tener toda la información de salud del animal y la información de su línea de custodia.

- Medicamentos y cosméticos: los cosméticos y medicamentos son productos especialmente sensibles. Es por eso por lo que su línea de custodia en la cadena de suministro debe protegerse. A diferencia de los sistemas de código de barras que brindan información por lotes, el sistema RFID proporciona a cada cosmético o medicamento un número de identificación único además de información adicional sobre fechas, origen y más de cada uno. Un sistema RFID es la forma más segura de rastrear este tipo de productos.

En resumen, etiquetar con RFID los medicamentos evita la falsificación, permite el etiquetado de medicación personalizada, el control de medicamentos de los pacientes y la eliminación rápida de lotes cuando hay un problema con un lote específico.

- Comercio sin contacto: se trata de probablemente la aplicación más conocida y utilizada en la vida diaria, las transacciones con tarjetas “*contactless*”. Permiten establecer la seguridad necesaria para realizar pago con ellas. El pago se realiza mediante teléfono móvil o con tarjetas especializadas para ello. En cuanto a las empresas, permite la recogida de tendencia y gustos por parte de los clientes, por lo que supone una ventaja para vendedores y para compradores, haciendo más cómodo, rápido y seguro el pago para estos últimos.
- Cronometraje deportivo: el etiquetado RFID de corredores o participantes en eventos deportivos simplifica el trabajo de temporizar a los atletas, y de rastrear sus recorridos. Al mismo tiempo, eso reduce los costes y aumenta la eficiencia y la seguridad.

Referencias

- [1] Roberti, M. (2005). The history of RFID technology. RFID journal, 16 (14 junio, 2021).
- [2] Sorrells, P. (1998). Passive RFID basics. Microchip Technology Inc, 7. (14 junio, 2021).
- [3] Jerry Landt. Shrouds of Time: The history of RFID. AIM Inc. 2001. (15 junio, 2021)
- [4] “La tecnología de espionaje de la Guerra Fría que todos usamos”
<https://www.bbc.com/mundo/noticias-49442319> (15 junio, 2021)
- [5] Blazquez del Toro, L. M.: “Sistemas de identificación por radiofrecuencia”. (15 junio, 2021)
- [6] Huamán, Marlene Reyes, and Daniel Elias Bravo Loayza. 2014. “Radiofrecuencia de Identificación (RFID): Microtecnología de Gran Impacto.”
Revista de investigación de Sistemas e Informática 7(2): 77–86. (17 junio, 2021)

- [7] Brock, D. L. (2001). The electronic product code (epc).
Auto-ID Center White Paper MIT-AUTOID-WH-002, 1-21. (17 junio, 2021)
- [8] Montenegro, G. A., & Marchesin, A. E. (2007).
Sistema de identificación por radiofrecuencia (RFID). Comisión Nacional de Comunicaciones. (17 junio, 2021)
- [9] Casas Brugués, O. (2020). Augment de les prestacions d'un lector RFID. (17 junio, 2021)
- [10] Sánchez, J. A. A. (2008). Sistema de Control de Acceso con RFID. México DF. (17 junio, 2021)
- [11] Monachesi, E., Frenzel, A. M., Chaile, G., Agustín, C., & López, F. A. G. (2011). Conceptos generales de Antenas. (18 junio, 2021)
- [12] Want, R. (2006). An introduction to RFID technology. *IEEE pervasive computing*, 5(1), 25-33. (19 junio, 2021)
- [13] Sunny, A. I., Tian, G. Y., Zhang, J., & Pal, M. (2016).
Low frequency (LF) RFID sensors and selective transient feature extraction for corrosion characterisation. *Sensors and Actuators*, 241, 34-43. (19 junio, 2021)
- [14] Qing, X., & Chen, Z. N. (2007).
Proximity effects of metallic environments on high frequency RFID reader antenna: Study and applications. *IEEE transactions on Antennas and Propagation*, 55(11), 3105-3111. (19 junio, 2021)
- [15] Nikitin, P. V., Rao, K. V. S., & Lazar, S. (2007, March). An overview of near field UHF RFID. In *2007 IEEE international conference on RFID* (pp. 167-174). IEEE. (20 junio, 2021)
- [16] Buettner, M., & Wetherall, D. (2008, September).
An empirical study of UHF RFID performance. In *Proceedings of the 14th ACM international conference on Mobile computing and networking* (pp. 223-234). (20 junio, 2021)
- [17] Global frequency regulations for RFID
<https://tagitsolutions.com/knowledge-base/global-frequency-regulations-for-rfid/> (21 junio, 2021)
- [18] Nistal González, I. (2011). *Sistemas RFID en UHF y Microondas* (Master's thesis). (21 junio, 2021)
- [19] Alava, M. COMPARACIÓN ENTRE LOS CÓDIGOS DE LÍNEA. (22 junio, 2021)
- [20] Sharma, A., Majumdar, S., Naugarhiya, A., Acharya, B., Majumder, S., & Verma, S. (2017, February).
VERILOG based simulation of ASK, FSK, PSK, QPSK digital modulation techniques. In *2017 International Conference on I-SMAC* (pp. 403-408). IEEE. (22 junio, 2021)
- [21] Ahsan, K., Shah, H., & Kingston, P. (2010).
RFID applications: An introductory and exploratory study. (22 junio, 2021)

3. Sistema de caracterización de tags

La primera tarea de la parte práctica de este trabajo es, como ya se ha comentado anteriormente, la creación de un sistema de caracterización de tags. El objetivo es, a partir de una “shield” de Arduino de bajo precio, programarla desde cero para crear un sistema que permita conocer la respuesta en frecuencia de las etiquetas de RFID. A continuación, se relatan los diferentes pasos llevados a cabo en el desarrollo del sistema.

3.1.1 Programación Arduino

En este proyecto se ha utilizado una tarjeta de expansión “Shield” de bajo coste para Arduino. Se trata de la SparkFun Simultaneous RFID Reader - M6E Nano (figura 17) [1], una placa compatible con Arduino. Está diseñada para leer las etiquetas EPCGlobal Gen 2 a una velocidad de hasta 150 etiquetas por segundo. Presenta una salida de potencia ajustable entre 0 y 27 dBm, permitiendo una distancia de lectura de hasta cinco metros con una antena adecuada o medio metro con la antena que la placa incorpora.



Figura 17. SparkFun Simultaneous RFID Reader - M6E Nano, “shield” compatible con Arduino
Fuente: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/simultaneous-rfid-tag-reader-hookup-guide/all>

Como podemos comprobar en su página web, el fabricante, Sparkfun, proporciona junto al hardware unas librerías básicas para programar el lector a través del IDE de Arduino. Estas librerías incorporan funciones que permiten comunicarse con el lector a través del microprocesador, para llevar a cabo acciones como el cambio de potencia de emisión del lector, seleccionar la banda en la que se quiere trabajar (europea, americana...) o el escaneo del código EPC, RSSI, entre otros, de los tags leídos. También nos proporciona una serie de ejemplos para leer la información de los tags, escribir en su memoria o incluso bloquear (matar) el tag.

Estas funciones son muy interesantes ya que nos permiten leer la información de cualquier tag solamente cargando las librerías, por ejemplo, para la segunda parte de nuestro trabajo, con unas modificaciones y añadiendo la conexión con el ESP32 para dotar al sistema de conexión Wi-Fi, podremos subir los valores de los códigos EPC leídos a una base de datos a través de MQTT de forma sencilla.

Sin embargo, la librería de Arduino no incluye ninguna función que nos permita cambiar la frecuencia a la que se escanean los tags, lo cual se necesita para el sistema de caracterización de tags. De manera que la primera tarea que se realizó fue crear una función que nos permita determinar la frecuencia del canal utilizado.

Se persigue caracterizar el tag en función de la frecuencia de interrogación del canal y poder estudiar efectos de desintonización del tag en función del material donde se ha adherido (en el caso de etiquetas “inlay”) y el correcto diseño de la antena del tag. Comercialmente existen un sistema de la empresa Vaoyantic que permite esta caracterización, pero tiene un coste muy elevado.

En primer lugar, se analizó la API (interfaz de programación de aplicaciones), donde se proporcionan librerías para poder programar el lector a través de lenguajes como C, C++ o Java. En ella se encontró un ejemplo, “RegionConfiguration.c” (código 1) [2], dónde se modifica la frecuencia de trabajo del lector, en lenguaje C. Por lo tanto, el trabajo consistiría en crear una función para Arduino adaptando este ejemplo.

El funcionamiento del ejemplo en C es el siguiente, primero establece la región de trabajo como “open”, lo que permite trabajar en cualquiera de las frecuencias posibles del lector. A continuación, carga un vector con todas las frecuencias en las que se va a trabajar. También determina el “hopTime” (tiempo durante el que escanea en una frecuencia antes de saltar a la siguiente), el “quantizationStep” (salto que existe entre las frecuencias de trabajo) y la frecuencia mínima.

```
// Step 1 - Set region to OPEN
region = TMR_REGION_OPEN;
// Step 2 - Set frequency hop table accordingly for a region
ret = TMR_paramSet(rp, TMR_PARAM_REGION_HOPTABLE, &value);
checkerr(rp, ret, 1, "Setting Hoptable");
// Step 3 - Set hop time
ret = TMR_paramSet(rp, TMR_PARAM_REGION_HOPTIME, &hopTime);
checkerr(rp, ret, 1, "Setting Hop Time");
// Step 4 - Set Quantization Step
TMR_paramSet(rp, TMR_PARAM_REGION_QUANTIZATION_STEP, &quantizStep);
checkerr(rp, ret, 1, "Setting Quantization Step");
// Step 5 - Set Minimum Frequency
TMR_paramSet(rp, TMR_PARAM_REGION_MINIMUM_FREQUENCY, &minFrequen);
checkerr(rp, ret, 1, "Setting Minimum Frequency")
```

Código 1. Líneas principales del ejemplo en lenguaje C RegionConfiguration

Una vez tiene estos parámetros determinados, los envía al lector a través de la función “TMR_ParamSet”. Esta función realiza diferentes llamadas a funciones secundarias, que no modifican los parámetros anteriormente comentados, hasta que se llama a la función “TMR_SR_cmdSetFrequencyHopTable” (código 2), que se encuentra en el archivo serial_reader_l3.c [3]. Esta función es la encargada de crear el mensaje que se enviará al lector a través de la conexión serie.

El mensaje consiste en un vector, en la primera casilla del cual se indica la longitud del mensaje. En las siguientes casillas, se envían los valores de la tabla de frecuencias. Las frecuencias que se incluyan en este vector serán las que escaneará el lector. Si solamente incluimos una frecuencia en el mensaje, el lector escaneará continuamente a esa frecuencia hasta que lo modifiquemos, lo cual es justo lo que necesitamos para realizar la caracterización de tags. El objetivo es escanear en una frecuencia hasta que se detecte el tag, y entonces saltar a la siguiente.

```
TMR_SR_cmdSetFrequencyHopTable(TMR_Reader *reader, uint8_t count,
                               const uint32_t *table)
{
    uint8_t msg[TMR_SR_MAX_PACKET_SIZE];
    uint8_t i=2, j;
```

```

if (count > 62)
    { return TMR_ERROR_TOO_BIG; }
SETU8(msg, i, TMR_SR_OPCODE_SET_FREQ_HOP_TABLE);
for (j = 0; j < count; j++)
    { SETU32(msg, i, table[j]); }
msg[1] = i - 3; /* Install length */

return TMR_SR_send(reader, msg);
}

```

Código 2. Función TMR_SR_cmdSetFrequencyHopTable, que crea y envía el mensaje para modificar la frecuencia de trabajo del lector

El último detalle que hay que tener en cuenta es que los valores de la tabla de frecuencia se han de enviar en bytes. Las frecuencias se indican en KHz, de manera que cada frecuencia está formada por 4 bytes. Antes de añadirlos al mensaje, se convierte de uint32, es decir un registro de 4 bytes, a 4 uint8, es decir 4 bytes consecutivos que codifican el valor de la frecuencia.

Finalmente, este vector formado por la longitud del vector seguido de los valores de la frecuencia en bytes es el que se envía por el puerto serie al lector. De manera que la función que se tenía que crear para Arduino tenía que realizar el mismo procedimiento y formar un mensaje con la misma estructura.

El primer paso para crear la función en Arduino fue comprobar cómo se comunicaba el microprocesador con el lector. Para ello, la librería de Sparkfun de Arduino, incorpora una función llamada “sendMessage” [4] que, simplemente con indicar el registro que se quiere modificar, el valor que se quiere enviar (en nuestro caso la frecuencia) y el tamaño del vector, crea y envía un mensaje con la estructura necesaria para comunicarse con el lector.

Por lo tanto, una vez comprendido el funcionamiento de todas estas funciones, que requirió un largo periodo de análisis de los archivos de la API, se procedió a crear la función de Arduino para modificar la frecuencia. Por lo visto anteriormente, esta función debe modificar el registro “TMR_SR_OPCODE_SET_FREQ_HOP_TABLE”. Para ello, mediante la función “sendMessage”, se forma un vector con el registro y el valor de la frecuencia deseado.

La función creada, llamada “setFrequency” (código 3), debe cambiar la frecuencia de trabajo del lector a la que se recibe por parámetro. De esta manera, cambiando el valor que se pasa a la función, podríamos recorrer todas las frecuencias para caracterizar los tags. Por tanto, y como hemos visto anteriormente, la función primeramente configura la región como “open”. A continuación, convierte el valor de la frecuencia a bytes, y por último, se llama a la función “sendMessage” indicando el registro a modificar, el vector creado con la frecuencia y el tamaño de este.

```

void RFID::setFrequency(uint32_t numero)
{
    setRegion(REGION_OPEN);
    uint32_t frequencyTable[1] = {numero};
    uint8_t size1 = sizeof(frequencyTable)/4;
    uint8_t x=0;
    uint8_t i=0;
    uint8_t data[size1*4];
    for (uint8_t n = 0; n < size1; n++)
    {
        uint32_t frequency = frequencyTable[n];
        uint8_t size2 = sizeof(frequency);
        while(x<size2){

```

```
        data[i] = (uint8_t)(frequency >> (8 * (size2 - 1 - x)));
        i++;
        x++;
    }
    x = 0;
}
sendMessage(TMR_SR_OPCODE_SET_FREQ_HOP_TABLE, data, sizeof(data));
}
```

Código 3. Función setFrequency creada para modificar la frecuencia de trabajo del lector a través del IDE de Arduino

Por último, añadimos la función al archivo de cabeceras “SparkFun_UHF_RFID_Reader.h” [5] e incluimos esta librería modificada en el IDE de Arduino. De esta manera ya podemos seleccionar la frecuencia a la que nos interesa que el lector escanee.

Una vez creada la función necesaria para cambiar la frecuencia de trabajo, el siguiente paso era realizar un programa en Arduino para comprobar la respuesta de los tags a las diferentes frecuencias. Es ahí donde se encontró la mayor limitación del lector. Para comprobar si efectivamente la función creada funcionaba correctamente, se conectó una antena de RFID a un analizador de espectros, y simultáneamente se cambiaba la frecuencia a la que emitía el lector. Se observaba cómo funcionaba correctamente, pero hacia la mitad del barrido de frecuencias, el sistema no respondía correctamente y comenzaba a escanear en el modo por defecto.

Analizando las especificaciones del lector encontramos el problema [6]. El lector permite leer en las bandas de frecuencias de las principales regiones del mundo destinadas a RFID, pero no permite emitir señales fuera de ellas. Es decir, el firmware del lector permite configurar frecuencias entre 859 y 873 MHz y entre 915 y 930 MHz, sin embargo, no permite emitir señales con frecuencias fuera de estos rangos. El sistema prohíbe estas frecuencias para evitar interferencias en sistemas que trabajen a frecuencias diferentes. Algunos lectores de mayor coste sí permiten esta opción en modo test.

En definitiva, normalmente para la caracterización de tags de UHF se escanean todas las frecuencias entre aproximadamente 860 y 930 MHz, pero en nuestro trabajo solamente se escanearán los rangos antes comentados. Esto no supone un problema demasiado grave, ya que, en las posibles frecuencias de trabajo de regiones como Europa, América o Asia, sí se puede caracterizar los tags.

De esta manera, se procedió a crear el programa en Arduino que escaneara los dos rangos de frecuencias posibles. El funcionamiento del programa es el siguiente: en primer lugar, configuramos la región abierta, indicamos la frecuencia mínima por la que comienza el escaneo, 859 MHz, y la potencia mínima a la que emite el lector. El lector escaneará en esta frecuencia, aumentando la potencia hasta que el tag responda. Una vez detectado el tag, se salta a la frecuencia siguiente y se reinicia el bucle de potencia. De esta manera se escanearán todas las frecuencias posibles, determinando la potencia mínima a la que ha de emitir el lector en cada frecuencia para detectar el tag.

3.1.2 Conexión antena externa

Una vez creado tanto el programa para caracterizar tags como las librerías necesarias, se procedió a la parte experimental. Para ello, me cité con mi tutor en el laboratorio de la universidad. En él, escaneamos diferentes tags y tomamos medidas.

El primer paso fue conectar una antena externa al lector. Todas las pruebas realizadas anteriormente se hicieron con la antena que incorpora el lector. Como el mismo fabricante

indica, la antena no permite un rango de lectura demasiado elevado, ya que la ganancia de la antena es de unos 0 dB aproximadamente. Para poder caracterizar los tags con más precisión, se conectó una antena externa.

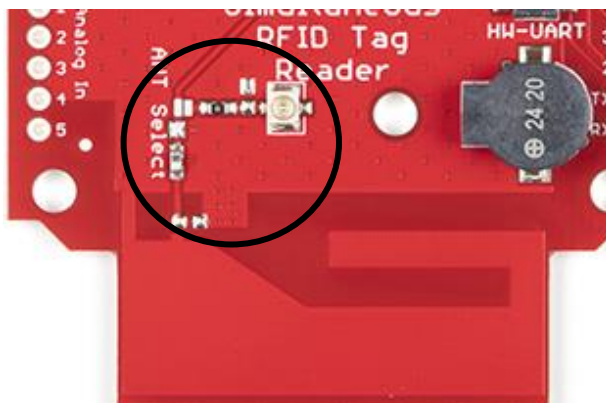


Figura 18. Salida de la señal que emite el lector. Permite utilizar la antena que incorpora o conectar una externa

Fuente: <https://www.sparkfun.com/products/14066>

Como se puede observar en la figura 18 y explica en las especificaciones, el lector presenta dos posibles salidas para la señal. Por defecto se utiliza la antena impresa que incorpora de fábrica la “shield”. Sin embargo, si desoldamos la resistencia que une el lector con la antena incorporada, y soldamos una pequeña resistencia de cero ohmios en la otra vía, podemos conectar el lector a una antena externa.

La antena utilizada fue la antena de UHF ID ISC.ANT.U250/250-EU/-FCC (figura 19) [7]. Se trata de una antena de polarización circular diseñada para trabajar en los rangos de UHF de 865-870 MHz y de 902-928 MHz. Esto permite utilizarla en aplicaciones con sistemas que trabajan tanto en los rangos europeos como en los norteamericanos. La ganancia aproximada de la antena es de 8.5 dBi, pese a que en la práctica puede variar en función de la frecuencia o la polarización.



Figura 19. Antena UHF utilizada para la parte experimental

Fuente: <https://www.digikey.es/product-detail/en/feig-electronic/1451-009-02/629-1009-ND/1015910>

3.1.2.1 Diseño del soporte con OpenScad

Esta antena se conecta al lector mediante un conector SMA, no es necesario ningún montaje extra. Lo que si era conveniente era diseñar un soporte para el conector, ya que el latiguillo SMA es muy frágil. De manera que se procedió a diseñar un soporte para el sistema formado por el Arduino UNO, el lector y el conector SMA. El diseño se realizó mediante el programa OpenScad para poder imprimirlo en 3D. El resultado fue el siguiente (figura 20).

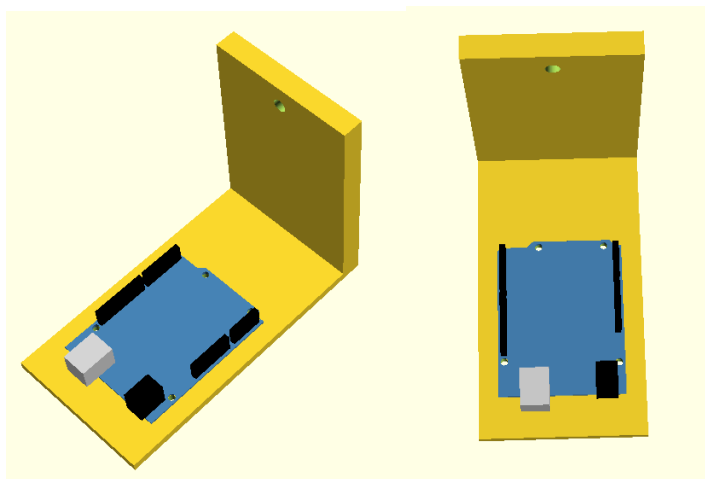


Figura 20. Diseño del soporte para el conector SMA con OpenScad
Fuente: Elaboración propia

El diseño tenía que incluir una base, con los agujeros colocados en los mismos puntos que los del Arduino para poder atornillarlo. Una pequeña distancia entre el Arduino y la pared donde se une el conector SMA, ya que el lector de RFID sobresale por ese costado y es necesario un pequeño espacio para poder conectar los cables. Por último, una pared con un agujero donde fijar el latiguillo SMA y suficientemente alta para que quede por encima de la “*shield*” del lector. El resultado final de la impresión se observa en la figura 21.

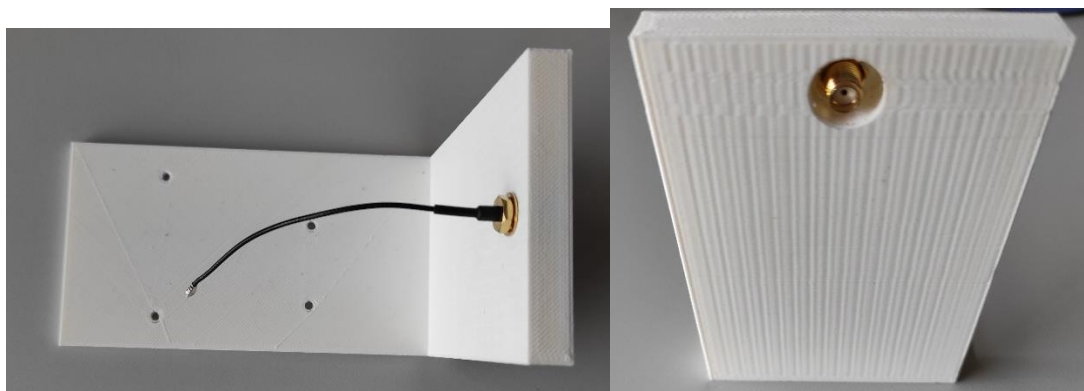


Figura 21. Impresión 3D del soporte para el montaje del Arduino
Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, de esta manera conseguimos que el latiguillo quede más protegido de una posible ruptura y que la salida hacia la antena externa sea más cómoda. También es útil para fijar el Arduino a la base y unir las diferentes “*shields*” que incorpora, el lector RFID, la “*shield*” de unión con el ESP32 y el propio ESP32.

3.1.2.2 Escaneo de las etiquetas en la cámara anecoica

Una vez conectado el lector a la antena, colocamos los diferentes tags que se querían caracterizar para llevar a cabo las pruebas. El tag se situó enfrente al lector, a 1.2 metros de distancia, dentro de una cámara anecoica (esta distancia está limitada por el tamaño de la cámara anecoica, idealmente debería de estar en la zona de campo lejano, o Fraunhofer $2D^2/\lambda$, donde D es la dimensión de la antena del lector). Una cámara anecoica es una sala diseñada para absorber en su totalidad las reflexiones producidas por ondas acústicas o electromagnéticas en cualquiera de las superficies que la conforman (suelo, techo y paredes laterales).

A su vez, la cámara se encuentra aislada del exterior de cualquier fuente de ruido o influencia sonora externa. La combinación de estos dos factores implica que la sala emule las condiciones acústicas que se darían en un campo libre, ajeno a cualquier tipo de efecto o influencia de la habitación fruto de dichas reflexiones.

Lógicamente la cámara anecoica de la universidad no se trata una cámara anecoica ideal, la cual sería una habitación entera, cubierta con cuñas en forma de pirámide con la base apoyada sobre la pared y construida con materiales que absorben el sonido y aumentan la dispersión o difusión del escaso sonido que no es absorbido. Algunos ejemplos de estos materiales son la fibra de vidrio o ciertas espumas. Sin embargo, para el uso docente y la toma de medidas no profesional, la cámara donde se realizaron las pruebas (figura 22) simula satisfactoriamente las condiciones de campo libre.



Figura 22. Cámara anecoica donde se realizaron las pruebas experimentales

Fuente: Elaboración propia

3.1.3 Cálculo teórico del “read range”

Una vez tenemos el montaje preparado, procedemos a realizar la caracterización de diferentes tags. Mediante el programa explicado anteriormente, obtenemos la potencia mínima de emisión del lector a la que responde el tag a la distancia determinada. El objetivo final es obtener el “read range” del tag, es decir, la distancia máxima a la que puede trabajar el tag correctamente, considerando que el lector emite señal a la máxima potencia permitida por la normativa. Esta distancia dependerá de la frecuencia, generalmente los tags testeados están diseñados para trabajar en la banda europea, por eso tendrán mejor respuesta alrededor de los 856 MHz que en la banda de 915 MHz.

Para calcular el “read range”, el procedimiento seguido es el siguiente. En primer lugar, utilizamos la fórmula de Friss (1), que nos permite calcular teóricamente la potencia recibida por la etiqueta.

$$Pr = \frac{P_{lector} \cdot G_{lector}}{(4 \cdot \pi \cdot R)^2} \cdot \frac{(\lambda)^2}{4 \cdot \pi} \cdot G_{tag} \quad (1)$$

En esta ecuación, la potencia del lector la obtenemos de la parte experimental, es la potencia mínima de emisión que requiere el lector para comunicarse con el tag a la distancia determinada. Este valor lo obtenemos mediante el programa de Arduino diseñado anteriormente. La distancia R, son los 1.2 metros que separan la antena del tag en la cámara anecoica. La ganancia del lector es la ganancia de la antena externa obtenido en su datasheet, 8.5 dBi. La ganancia del tag es 0 y, por último, el valor de lambda variará en función de la frecuencia que estemos calculando.

El siguiente paso es desarrollar el mismo caso para la potencia máxima permitida por la normativa (2).

$$Pr = \frac{PIRE}{(4 \cdot \pi \cdot R_{max})^2} \cdot \frac{(\lambda)^2}{4 \cdot \pi} \cdot G_{tag} \quad (2)$$

En este caso, el valor máximo de la PIRE (o EIRP en inglés), al tratarse de la normativa europea, es de 3.28 W (35.16 dBm), que corresponde con los 2 W en ERP (33 dBm), que recordamos es el máximo permitido en la región europea según hemos visto en el apartado 1.2.3.1. En el caso de la banda americana, la PIRE máxima permitida es de 4 W (36 dBm). El valor de lambda y la ganancia del tag es el mismo que en el apartado anterior. La distancia máxima es la incógnita que buscamos en el siguiente paso.

El siguiente paso es buscar la relación entre ambas fórmulas para poder calcular el valor del “read range” (3) (4) (5).

$$\frac{Pr_{medida}}{Pr_{max}} = \frac{P_{min} \cdot G_{lector}}{R^2 \cdot PIRE} \cdot R_{max}^2 \quad (3)$$

$$1 = \frac{P_{min} \cdot G_{lector}}{R^2 \cdot PIRE} \cdot R_{max}^2 \quad (4)$$

$$R_{max} = R \cdot \sqrt{\frac{PIRE}{P_{min} \cdot G_{lector}}} \quad (5)$$

De esta manera, podemos calcular teóricamente el valor de la distancia máxima a la que puede trabajar el tag mediante: la distancia de medida R que son 1.2 metros, la PIRE máxima que son 33.4 dBm en Europa, la potencia mínima de emisión del lector que obtenemos mediante el programa de Arduino en función de la frecuencia y la ganancia de la antena que son aproximadamente 8.5 dBi. A continuación, se presentan los cálculos y resultados obtenidos tras el análisis experimental de diferentes tags.

3.1.4 Resultados obtenidos

En primer lugar, se presentan los resultados obtenidos por los diferentes tags en formato de tabla. El primer tag que se escaneó es el siguiente (figura 23).

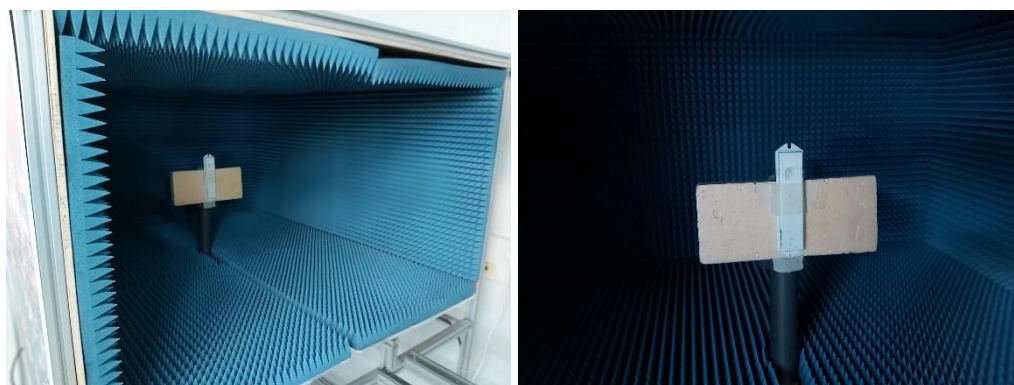


Figura 23. Tag de plástico caracterizado
Fuente: Elaboración propia

Se trata de un tag de plástico diseñado para trabajar en la banda europea y bastante resistente a las interferencias. Para poder comprobar como de importante es la posición en la que se escanean los tags de RFID, se hicieron dos escaneos para cada tag. Uno en posición vertical y otro en horizontal. Pese a que la antena es de polarización circular, es de esperar que en las medidas horizontales se requiera una mayor potencia del lector, ya que la antena no es ideal y emite con mayor ganancia en el eje vertical que en el horizontal. En las tablas

siguientes (tablas 1 y 2) se muestran las potencias del lector mínimas para que el tag responda y el código EPC pueda ser leído. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Respuesta del tag de plástico con orientación vertical

Frecuencia (MHz)	P lector (dBm)	Frecuencia (MHz)	P lector (dBm)
859	10	915	11
860	9,5	916	11,5
861	9	917	11,75
862	9	918	12
863	8,75	919	12,5
864	8,5	920	12,75
865	8,5	921	13,25
866	8,25	922	13,5
867	8	923	13,75
868	7,75	924	14
869	7,75	925	14,5
870	7,75	926	14,5
871	7,5	927	14,75
872	7,5	928	15
873	7,75	929	15
		930	14,75

Tabla 1. Resultados obtenidos del escaneo del tag de plástico con orientación vertical
Fuente: Elaboración propia

- Respuesta del tag de plástico con orientación horizontal

Frecuencia (MHz)	P lector (dBm)	Frecuencia (MHz)	P lector (dBm)
859	14,75	915	22,25
860	14,25	916	22,5
861	14	917	23
862	14	918	23,25
863	14,5	919	23,5
864	14,5	920	24
865	14,5	921	24
866	14,5	922	24,5
867	14,5	923	24,75
868	14,5	924	25

869	14,75	925	25
870	14,75	926	25
871	15	927	25
872	14,75	928	25
873	15,5	929	25
		930	25

Tabla 2. Resultados obtenidos del escaneo del tag de plástico con orientación horizontal
Fuente: Elaboración propia

Como podemos comprobar, existe una gran diferencia en un mismo tag en función de la orientación. Gracias a la caracterización del tag podemos comprobar cómo, a las frecuencias para las que fue diseñado el tag (en torno a los 870 MHz), se puede leer la etiqueta con una potencia de emisión de unos 15 dBm sin importar la posición de este. En cambio, en la banda americana (en torno a los 915 MHz), si el tag no se encuentra alineado con la antena del lector, se requiere una mayor potencia de emisión o incluso no podríamos leerlo de ninguna manera. Esto se debe a que este tag fue diseñado para su uso en la banda europea y su antena esta desintonizada en la banda americana.

Repetimos el mismo proceso con un tag diferente. Se trata de un tag llamado “alien”, (figura 24) diseñado para adherirse a objetos. También escanaremos ambas orientaciones para comprobar si existe diferencia. Los resultados obtenidos se recogen en las tablas 3 y 4.



Figura 24. Tag “alien” caracterizado
Fuente: Elaboración propia

➤ Respuesta del tag “alien” con orientación vertical

Frecuencia (MHz)	P lector (dBm)	Frecuencia (MHz)	P lector (dBm)
859	9	915	7,25
860	8,5	916	7.5
861	8	917	8
862	7,75	918	8,25
863	7.5	919	8,75
864	7,5	920	9
865	7,25	921	9
866	7,25	922	9,5
867	7	923	9,5

868	6,75	924	9,5
869	6,75	925	9,75
870	6,75	926	10
871	6,75	927	10
872	6,5	928	10,25
873	6,75	929	10,25
		930	9,75

Tabla 3. Resultados obtenidos del escaneo del tag “alien” con orientación vertical
Fuente: Elaboración propia

➤ Respuesta del tag “alien” con orientación horizontal

Frecuencia (MHz)	P lector (dBm)	Frecuencia (MHz)	P lector (dBm)
859	13,75	915	20,25
860	13,5	916	20,5
861	13,25	917	20,75
862	13,25	918	21,25
863	13,5	919	21,5
864	13,5	920	21,75
865	13,75	921	22
866	13,75	922	22
867	13,75	923	22,25
868	13,75	924	22,25
869	14	925	22,5
870	14	926	22,25
871	14	927	22,5
872	14	928	22,5
873	14,75	929	22,25
		930	22,25

Tabla 4. Resultados obtenidos del escaneo del tag “alien” con orientación horizontal
Fuente: Elaboración propia

De nuevo observamos el mismo comportamiento. Con orientación vertical los resultados son mejores, esto está provocado, cómo se ha comentado anteriormente, debido a que la antena pese a ser de polarización circular, en la práctica no emite de la misma manera en las dos polarizaciones (emite unos 3 dB menos en horizontal debido a la relación axial de 3dB especificada por el fabricante de la antena del lector). También comprobamos que este tag también se encuentra diseñado para trabajar en la banda de frecuencias europea, ya que se requiere mucha menos potencia para detectar el tag que en la banda superior.

Para poder observar mejor la respuesta en frecuencia del tag y poder calcular el “*read range*”, mostraremos los resultados gráficamente mediante una rutina del programa MATLAB. El código utilizado es el siguiente (código 4):

```
PIREmaxdBm=33.4; %PIRE máxima según la normativa de la UE en dBm
LdB=1;           %Pérdidas aproximadas debido a los cables entre antena
                y "reader"
GadB=8.5;       %Ganancia de la antena del lector
r0=1.2;         %Distancia entre antena y tag
M=load('tagplasticohorizontal.txt');%Cargamos los resultados
                obtenidos experimentalmente
freq=M(:,1)/1000;%Creamos el vector de frecuencia en MHz
PdBm=M(:,2);    %Creamos el vector de potencia en dBm

PIREmax=10^(PIREmaxdBm/10)*1e-3; %Convertimos el valor de la PIRE
                máxima permitida a lineal
PIREmedidadBm=PdBm+GadB-LdB;      %Aplicamos las fórmulas presentadas
PIRE=10.^(PIREmedidadBm/10)*1e-3; anteriormente

Rmax=r0*sqrt(PIREmax./PIRE);     %Obtenemos el valor de la distancia
                máxima a la que se lee el tag o read
                range
```

Código 4. Rutina de Matlab para calcular y representar el “*read range*”

Una vez tenemos los valores calculados representamos las dos gráficas que nos interesan estudiar, la potencia a la que responde el tag en función de la frecuencia y el “*read range*” en función de la frecuencia. Al tener prohibidas las frecuencias intermedias entre las dos bandas, se representan únicamente las frecuencias disponibles.

➤ Tag de plástico con orientación vertical

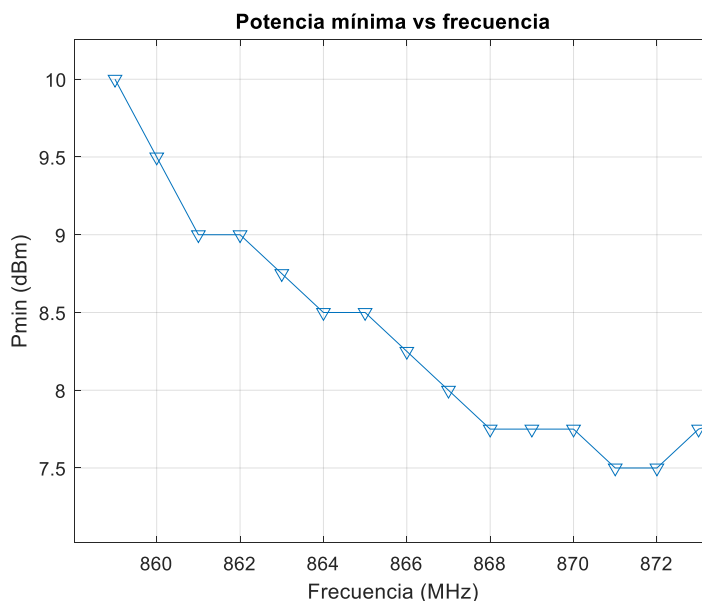


Figura 25. Gráfica de la potencia mínima necesaria para escanear el tag de plástico con orientación vertical en función de la frecuencia en la banda europea

Fuente: Elaboración propia

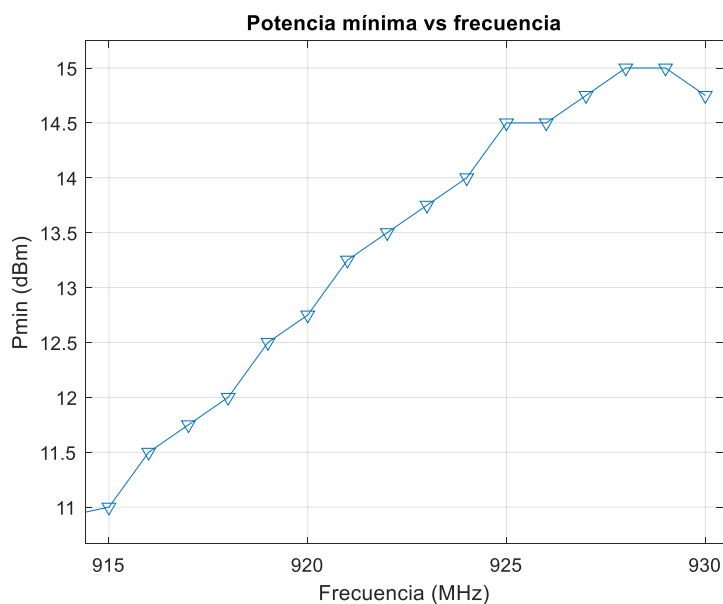


Figura 26. Gráfica de la potencia mínima necesaria para escanear el tag de plástico con orientación vertical en función de la frecuencia en la banda americana
Fuente: Elaboración propia

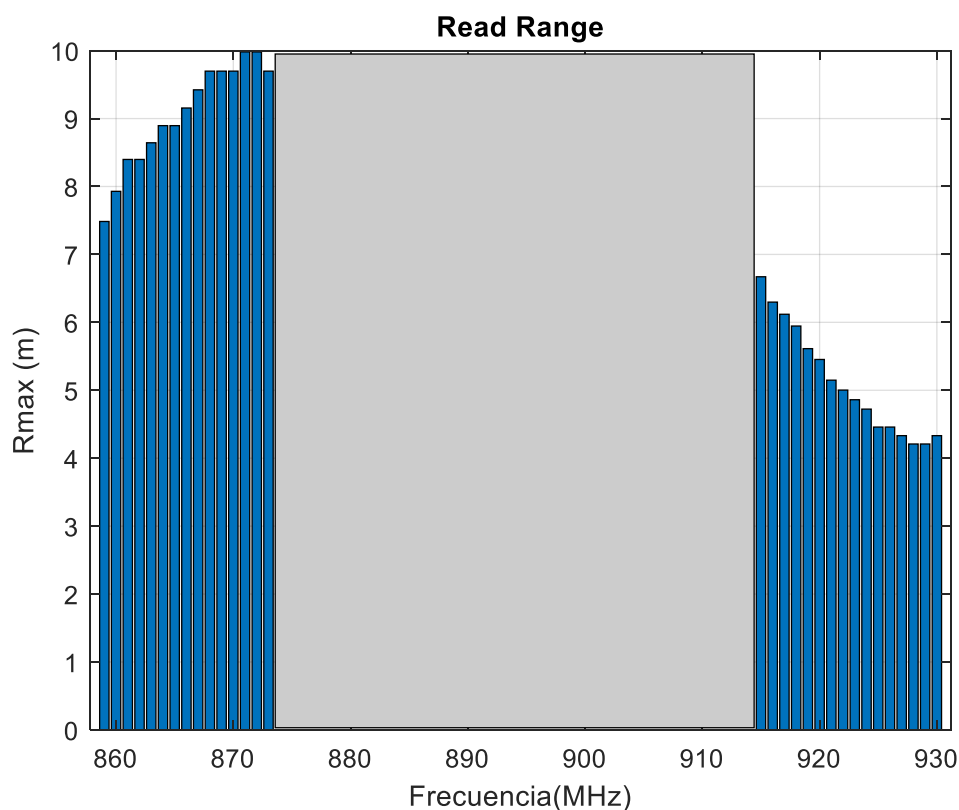


Figura 27. “Read range” del tag de plástico con orientación vertical
Fuente: Elaboración propia

Para este primer caso, podemos ver la respuesta en frecuencia del tag gráficamente (figuras 25 y 26), observando cómo a medida que aumenta la frecuencia, aumenta también la potencia necesaria para poder leer el tag. En el cálculo del “read range” (figura 27), si se trabaja a la frecuencia en la que el tag está sintonizado, aproximadamente 870 MHz, se puede

llegar a escanear el tag a una distancia de hasta diez metros, mientras que, si se trabaja en la banda americana, la distancia de lectura disminuye hasta los cuatro metros.

- Tag de plástico con orientación horizontal

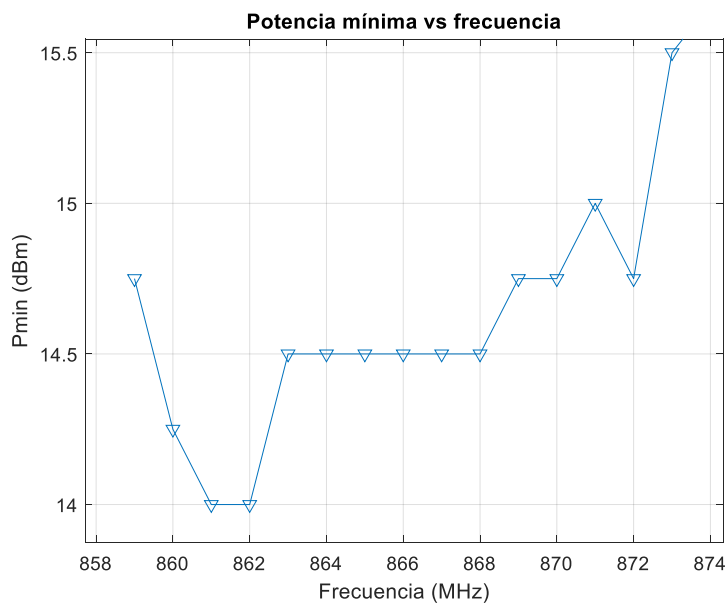


Figura 28. Gráfica de la potencia mínima necesaria para escanear el tag de plástico con orientación horizontal en función de la frecuencia en la banda europea
Fuente: Elaboración propia

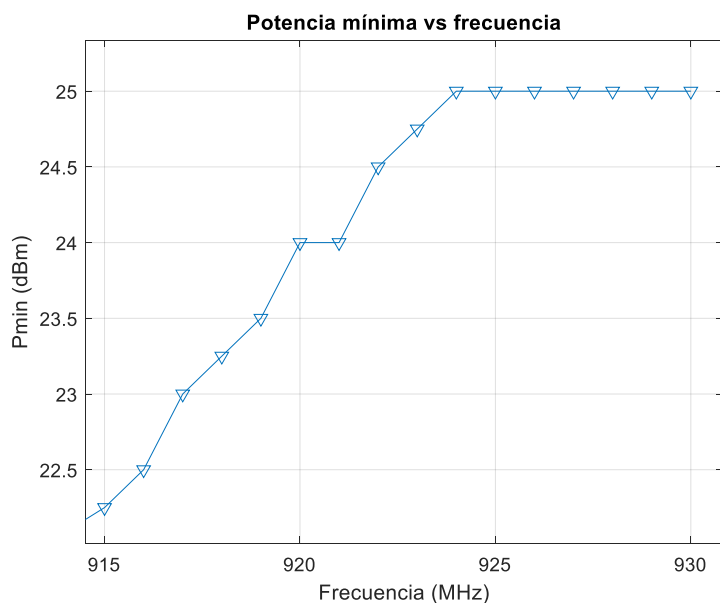


Figura 29. Gráfica de la potencia mínima necesaria para escanear el tag de plástico con orientación horizontal en función de la frecuencia en la banda americana
Fuente: Elaboración propia

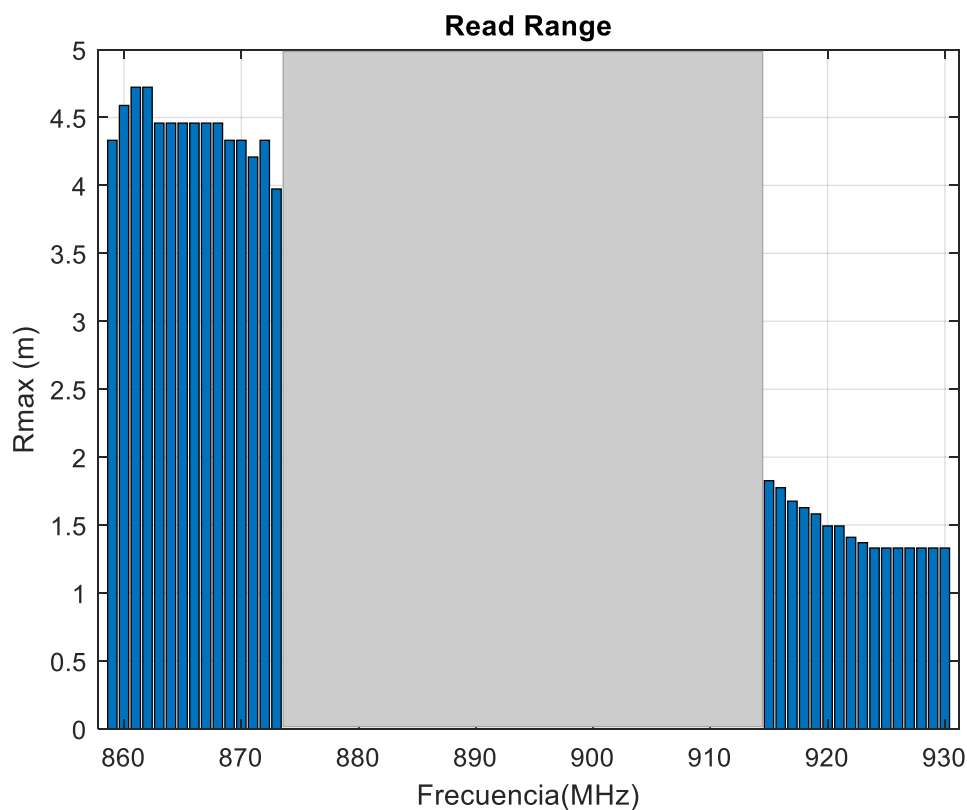


Figura 30. “Read range” del tag de plástico con orientación horizontal
Fuente: Elaboración propia

Podemos observar como el comportamiento en frecuencia (figuras 28 y 29) es el mismo que en el caso anterior. En la banda de 860 MHz se detecta el tag con mayor facilidad que en la banda de los 920 MHz.

Respecto al “read range” (figura 30), si comparamos con la gráfica anterior podemos comprobar cómo la distancia máxima de lectura se reduce hasta la mitad si el tag no se encuentra encarado con la antena. Pese a ello, en la banda europea la distancia máxima es de unos cuatro metros y medio, una distancia bastante aceptable para las aplicaciones de RFID.

➤ Tag alien con orientación vertical

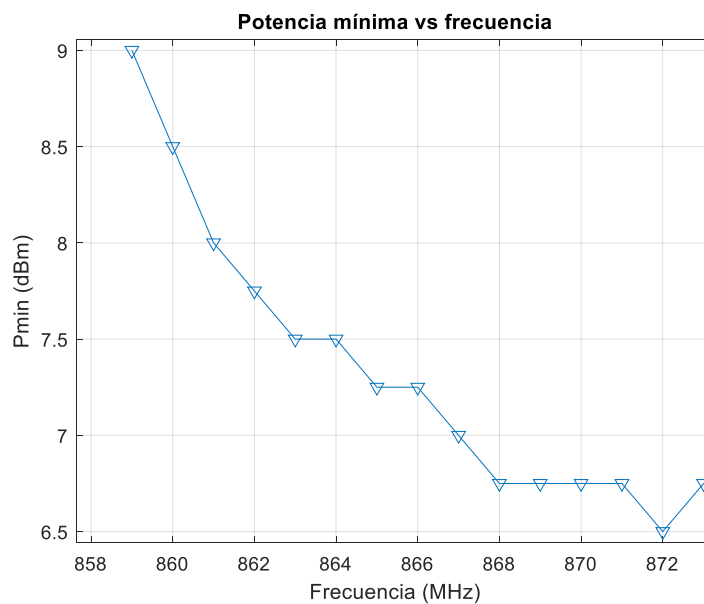


Figura 31. Gráfica de la potencia mínima necesaria para escanear el tag alien con orientación vertical en función de la frecuencia en la banda europea
Fuente: Elaboración propia

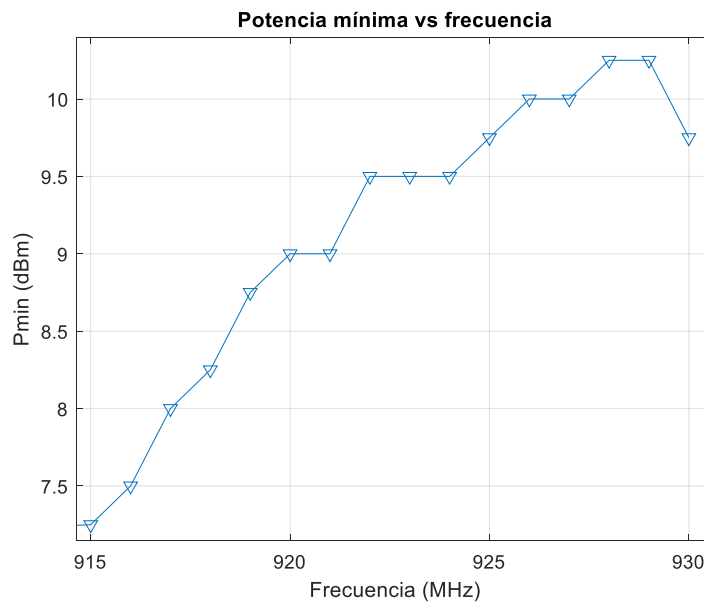


Figura 32. Gráfica de la potencia mínima necesaria para escanear el tag alien con orientación vertical en función de la frecuencia en la banda americana
Fuente: Elaboración propia

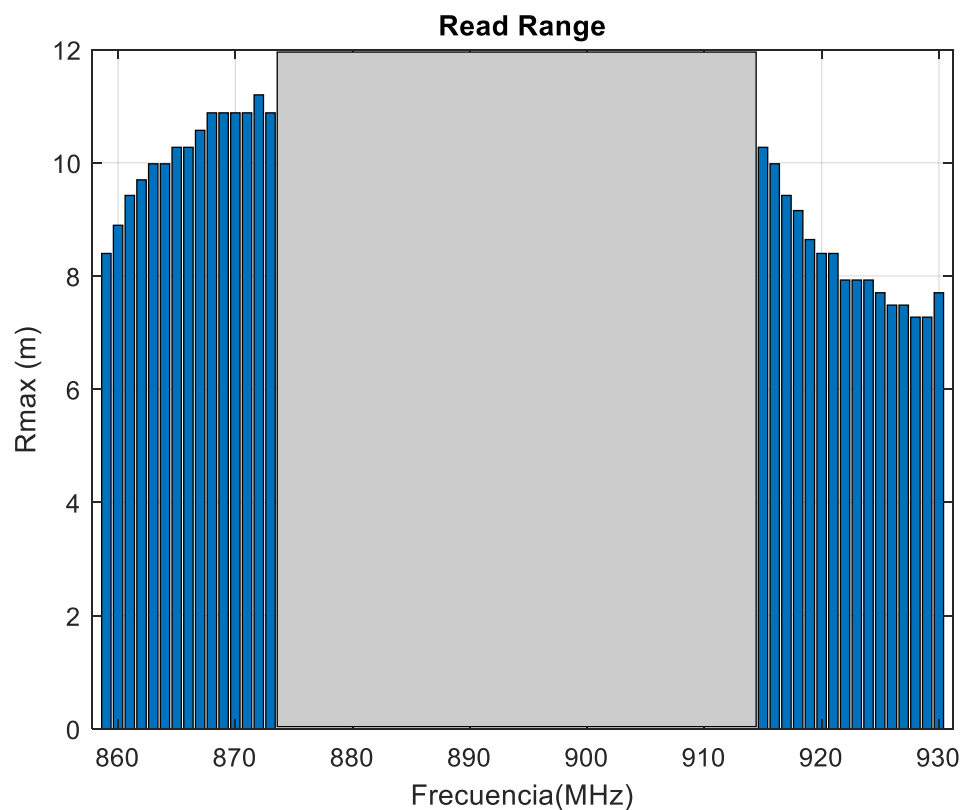


Figura 33. “Read range” del tag alien con orientación vertical
Fuente: Elaboración propia

Al caracterizar este tag alien comercial, comprobamos que se trata de un tag mejor diseñado que el anterior. En primer lugar, la potencia mínima necesaria para escanear el tag es sensiblemente menor que con el tag de plástico, especialmente en la banda americana (figuras 31 y 32). Mientras que en la banda americana con el tag de plástico la potencia mínima aumentaba considerablemente, en el tag alien aumenta solamente hasta los 10 dBm. Por lo tanto, pese a que el tag alien está sintonizada para trabajar en la banda de frecuencias europea, presenta unos resultados aceptables en la banda americana.

Respecto al rango de lectura (figura 33), si trabajamos en las frecuencias óptimas se puede llegar a escanear a una distancia de hasta once metros, mientras que, en la banda de los 920 MHz, la distancia máxima es de unos ocho metros, un valor bastante alto.

➤ Tag alien con orientación horizontal

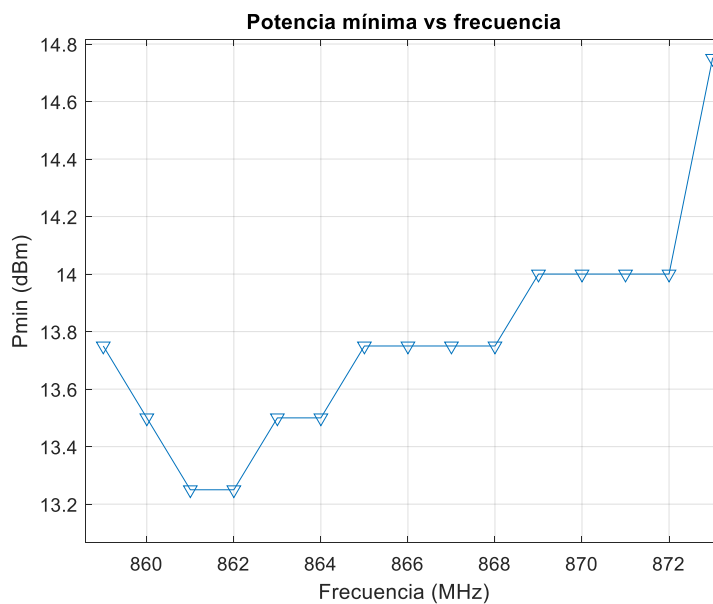


Figura 34. Gráfica de la potencia mínima necesaria para escanear el tag alien con orientación horizontal en función de la frecuencia en la banda europea
Fuente: Elaboración propia

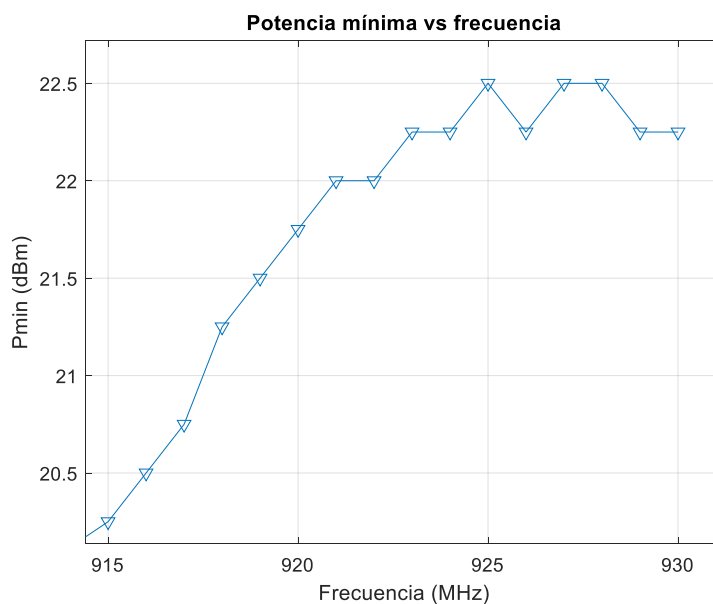


Figura 35. Gráfica de la potencia mínima necesaria para escanear el tag alien con orientación horizontal en función de la frecuencia en la banda americana
Fuente: Elaboración propia

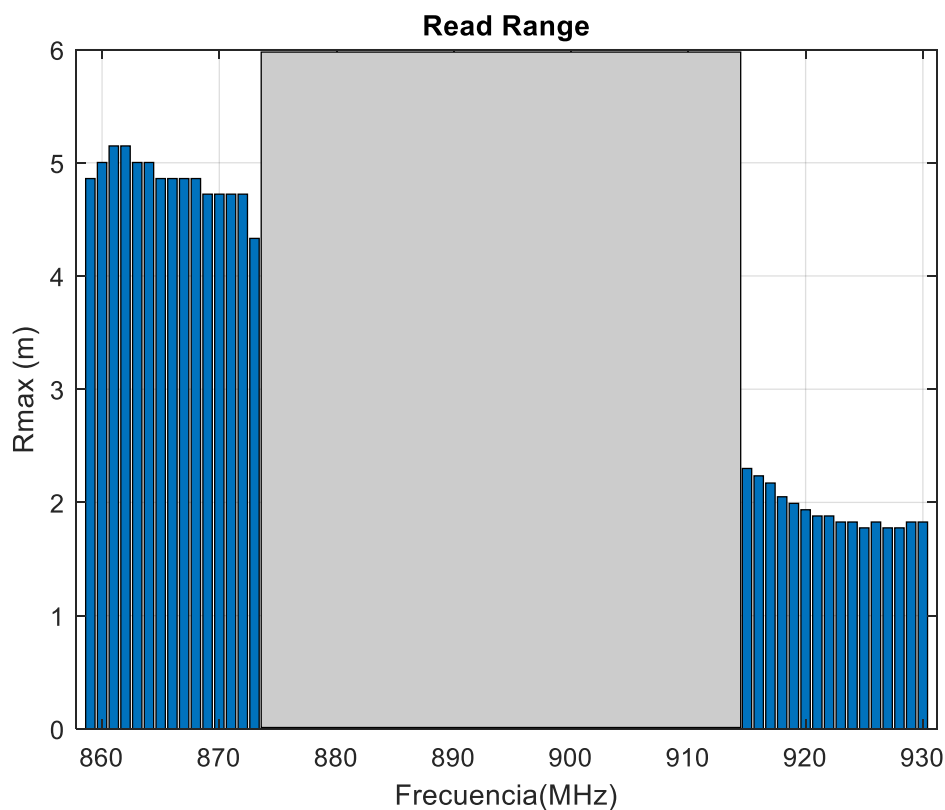


Figura 36. “Read range” del tag alien con orientación horizontal
Fuente: Elaboración propia

En este último caso, se observa las importantes diferencias que surgen en función de la orientación del tag. Mientras que en posición vertical los resultados eran bastante satisfactorios, con orientación horizontal el rango de lectura disminuye considerablemente (figura 36), y la potencia de lectura aumenta (figuras 34 y 35). Es importante destacar, como hemos comentado anteriormente, que este cambio es debido en gran medida a que la antena, pese a ser de polarización circular, no emite uniformemente en ambas polarizaciones. Esto provoca lo que observamos en las gráficas, la potencia mínima para detectar el tag aumenta un par de dB mientras que el “read range” disminuye hasta la mitad.

Hay que destacar que estos valores de “read range” son en condiciones ideales de propagación, por tanto, en entornos con propagación multicamino o reflexiones en el suelo pueden reducirse notablemente hasta incluso la mitad.

4. Simulación de una aplicación real de RFID

La segunda parte de la parte práctica del trabajo consiste, como ya se ha presentado anteriormente, en la recogida, almacenamiento y procesado de datos escaneados por el lector de RFID. En este caso nos centraremos en los códigos EPC que identifican cada tag, y se desarrollará un sistema para subirlos y almacenarlos en una base de datos. También se podrían tratar otros valores obtenidos del escaneo del lector como el RSSI.

Para hacerlo, en primer lugar, utilizaremos el lector de RFID en modo de lectura continua que nos proporciona el fabricante. Esto nos permite obtener el código EPC de todos los tags que se escanean. A continuación, subiremos este valor a un servidor de MQTT. Para hacerlo necesitamos dotar al sistema de conexión Wi-Fi. Esto lo haremos conectando en serie el Arduino con un ESP32.

Una vez tenemos el código identificador enviado al servidor MQTT, mediante un programa en lenguaje Python, almacenaremos los datos en una base de datos que se creará en el disco local. Por último, mediante una rutina de MATLAB, se podrán realizar búsquedas filtradas de los valores almacenados. A continuación, se presenta detalladamente todo el proceso realizado.

4.1.1 Escaneo y subida de los códigos EPC al servidor MQTT

4.1.1.1 Programación Arduino

El primer paso para llevar a cabo el almacenamiento de los códigos EPC es programar el lector de RFID mediante el Arduino UNO para que escanee los códigos. Para ello disponemos en la librería que proporciona Sparkfun un ejemplo donde se escanean continuamente los tags que se encuentran en el campo del lector. Cargamos el ejemplo `Constant_Read` [8] en el Arduino y simplemente modificando los campos que deseamos obtener en el escaneo (para nuestro caso el código EPC), ya tenemos el lector continuamente escaneando. En este caso no hace falta crear ninguna función nueva como sucedía en el apartado anterior.

El siguiente paso consiste en subir el código EPC a un servidor MQTT. Se escogió esta tecnología ya que es fácil de integrar con el lenguaje de Arduino y se había trabajado en clase. Se podrían haber utilizado otro protocolo de mensajería y el resultado sería el mismo. Para hacerlo se requiere de conexión a Internet mediante Wi-Fi.

Con esas condiciones, la idea inicial era conectar el lector al ESP32 directamente, sin necesidad de un Arduino UNO, y que el ESP actuará como microprocesador, escaneando mediante el lector de tags y subiendo los datos al servidor de MQTT. En la práctica no fue posible, el ESP32 no tiene suficiente potencia para alimentar el lector de tags, es por eso por lo que se decidió crear una comunicación entre ambos microprocesadores. El Arduino UNO se encarga de escanear los tags mientras que el ESP32 sube los códigos EPC al servidor.

4.1.1.2 Conexión Arduino Uno y Esp32

La conexión entre los dos microprocesadores se trata simplemente de una conexión serial, donde el ESP lee los datos que el Arduino envía por el puerto serie. Para ello en el programa que cargamos en el Arduino UNO, simplemente mostramos por el monitor serie el código EPC escaneado. El ESP32 estará conectado a los pines del puerto serie del Arduino (los pines 0 y 1), de esta manera podremos leer con el ESP32 los códigos EPC que el Arduino escanea y envía por el puerto serie.

Para poder realizar la conexión entre los pines, en primer lugar, aseguramos que no hubiera problema debido a la diferencia de tensiones. Los pines del Arduino UNO trabajan a 5 V mientras que los del ESP32 lo hacen a 3.3 V. Es por ello por lo que se introduce un divisor de tensión entre las conexiones de los dos micros.

La conexión se realizó entre los pines Rx y Tx del Arduino (pines 0 y 1), y los del ESP32 (pines 16 y 17 respectivamente). El pin de transmisión del Arduino se conecta al de recepción del ESP y viceversa. Para hacer las primeras pruebas se utilizó una protoboard para conectar ambos microprocesadores, pero por comodidad y para poder incluir tanto el ESP como el Arduino como el lector y la base anteriormente fabricada en 3D, se fabricó una “shield” que uniera los dos micros.

Para hacerlo se utilizó el programa KiCad, también utilizado en algunas asignaturas de la carrera, por lo que ya había utilizado esta herramienta anteriormente. El objetivo era diseñar una placa que uniera los pines de transmisión y recepción de los dos elementos y la alimentación (5 V y GND), para alimentar el ESP32 desde el propio Arduino.

El procedimiento que se siguió es el siguiente. En primer lugar, se crea un proyecto de KiCad que incluya un Arduino Uno. Esta opción se encuentra integrada en el programa y facilita el trabajo, ya que coloca los pines del Arduino separados por la distancia adecuada. A continuación, se colocaron dos filas de diecinueve pines de distancia estándar para el ESP32. Se unieron las conexiones anteriormente comentadas y además se introdujeron dos resistencias para realizar el divisor de tensión. El resultado del esquemático creado fue el siguiente (figura 37).

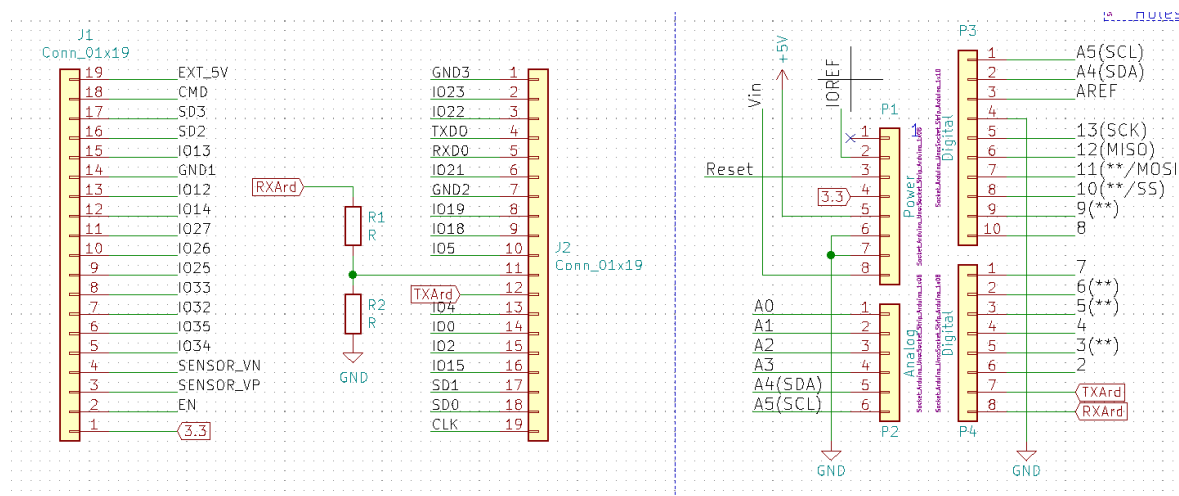


Figura 37. Esquemático creado con el programa KiCad. A la izquierda las dos filas de pines del ESP32, a la derecha los pines del Arduino UNO. Incluye las conexiones necesarias entre pines

Fuente: Elaboración propia

Una vez creado el esquemático, se procede a crear la PCB (printed circuit board). Mediante la herramienta “Update from schematic”, se incluyen los componentes y conexiones diseñadas en el esquemático a la PCB. El siguiente paso es situar las dos filas de pines del ESP en horizontal, atravesadas encima del Arduino. Es importante que las dos filas queden a la misma altura para que no haya errores a la hora de fabricar la pieza. Por último, enrutamos las pistas de conexiones y añadimos un plano de masa. El resultado obtenido es el siguiente (figuras 38 y 39).

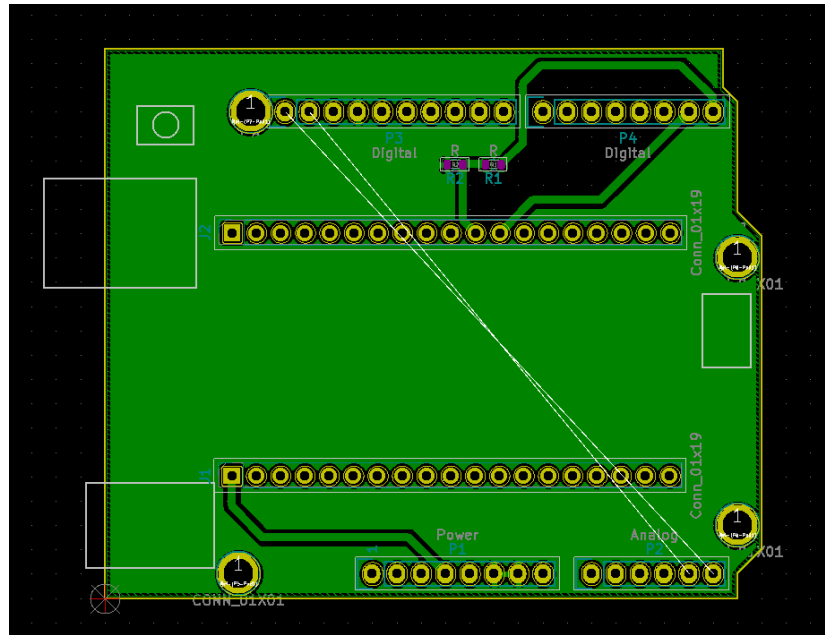


Figura 38. Diseño de la PCB mandada a imprimir.

Fuente: Elaboración propia

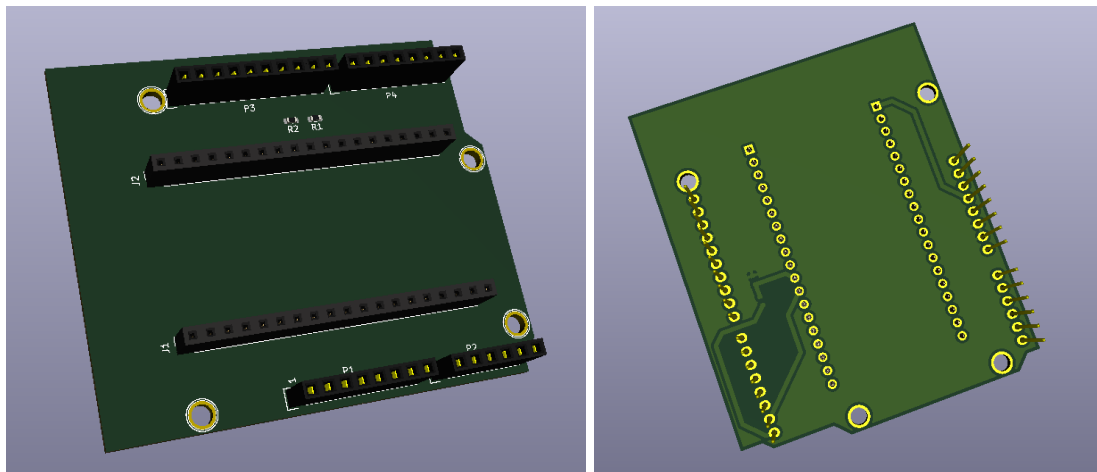


Figura 39. Visión 3D del programa KiCad de la PCB. Se observan como quedarán los pines de la parte superior y las conexiones en la cara inferior.

Fuente: Elaboración propia

Este diseño lo mandé a mi tutor del trabajo para imprimirlo en la universidad. El procedimiento de impresión fue con ácido, también estudiado y probado durante mis estudios. El resultado final es el que se observa en la figura 40.

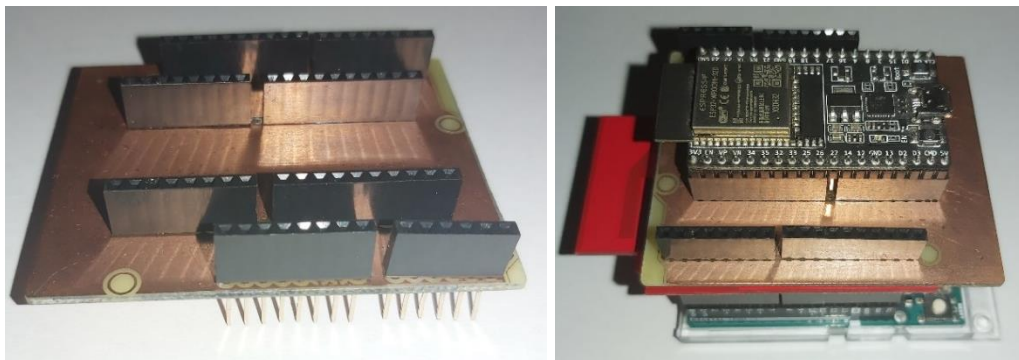


Figura 40. “Shield” de unión del Arduino Uno y del ESP32

Fuente: Elaboración propia

De esta manera, quedaba diseñada la conexión entre el Arduino y el ESP32. A continuación, se procedió a programar el envío de los códigos EPC leídos al servidor.

4.1.1.3 Envío de datos al bróker MQTT

Con el proceso del apartado anterior, conseguimos que el ESP32 pueda leer el código EPC leído por el Arduino UNO. El siguiente paso es programar el ESP para interpretar los códigos y enviarlos a un servidor de MQTT. Este servidor recibe el nombre de bróker.

A modo de resumen, en el protocolo MQTT [9] existen tres componentes claves. En primer lugar, el bróker, que es el servidor que acepta mensajes publicados por clientes y los difunde entre los clientes suscritos. Los clientes, que pueden publicar mensajes, suscribirse para recibir mensajes, o ambos. Y por último los tópicos, los mensajes deben estar etiquetados con algún tópico o tema. Los clientes se suscriben a tópicos específicos, de manera que solo reciben los mensajes publicados con dichos tópicos.

De esta manera el ESP32 deberá enviar al bróker un mensaje con el código EPC y con un tópico. Posteriormente, mediante Python nos suscribiremos a dicho tópico en el mismo bróker y de esa manera podremos recibir los mensajes que envíe el microprocesador.

El código Arduino (código 5) que debemos cargar en el ESP32 debe funcionar de la siguiente manera. En primer lugar, se inicializa la conexión a internet a través de Wi-Fi, a continuación, se conecta con el bróker, en nuestro caso se utilizó el bróker público de HiveMQ. Por último, se leen los códigos EPC y se publican en el tópico TFG/EPC.

```
const char* ssid = "MOVISTAR_8B04-EXT";           //Nombre del router
const char* password = "C8gñtqFGu6YBkWLBNCjq"; //Contraseña
const char* mqttServer = "broker.hivemq.com";    //dirección del server
                                                    MQTT, en nuestro caso hivemq
const int mqttPort = 1883;                       //TCP port
#define RX_PIN 16                                //PIN 1 ARDUINO
#define TX_PIN 17                                //PIN 0 ARDUINO
BT1.begin(115200, SERIAL_8N1, RX_PIN, TX_PIN);
while (BT1.available())
{
  char c = BT1.read() ;
  codigo = codigo + c;
}
if (codigo != "") {
  Serial.print(codigo);
  char charBuf[45];
  codigo.toCharArray(charBuf, 45);
  client.publish("TFG/EPC", charBuf);
  client.loop();
  codigo = "";
}
}
```

Código 5. Líneas principales del programa cargado en el ESP32. Se encarga de recibir y enviar al bróker los códigos EPC escaneados

Mediante este proceso conseguimos realizar el envío de mensajes al servidor, como podemos comprobar en la figura 41. El siguiente paso consiste en recibir esos datos y estructurarlos en forma de base de datos.

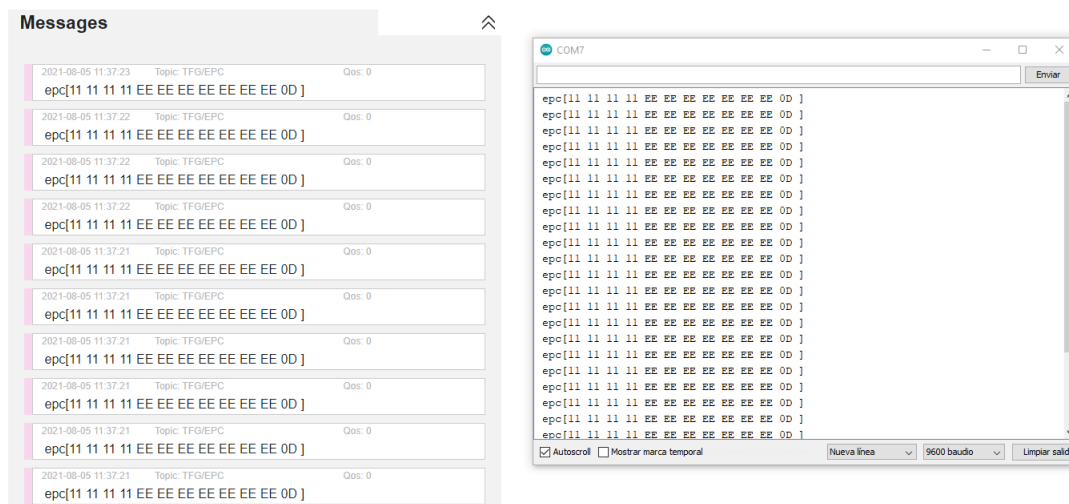


Figura 41. A la izquierda una imagen de los mensajes recibidos si nos suscribimos al t3pico. A la derecha los c3digos EPC le3didos por el ESP32.

Fuente: Elaboraci3n propia

4.1.2 Creaci3n de una base de datos mediante Python

El siguiente objetivo es crear un programa en lenguaje Python que sea capaz de suscribirse a un t3pico de MQTT y, mientras est3 conectado al br3ker, almacenar los mensajes que se env3en en una base de datos. Para ello el primer paso es descargar el programa y las librer3as necesarias. Se escogi3 el lenguaje Python ya que es un lenguaje de programaci3n interpretado cuya filosof3a hace hincapi3 en la legibilidad de su c3digo. Se trata de un lenguaje de programaci3n multiparadigma, ya que soporta parcialmente la orientaci3n a objetos, programaci3n imperativa y, en menor medida, programaci3n funcional. Es un lenguaje interpretado, dinámico y multiplataforma [10].

Podemos descargar el programa en su p3gina oficial, mientras que para a3adir las librer3as procederemos de la siguiente manera. Abrimos una l3nea de comandos y nos situamos en el directorio d3nde se encuentra el programa Python. Una vez hecho, introduciremos las siguientes l3neas (c3digo 6), la primera de ellas nos permite descargar librer3as mientras que la segunda a3ade las funcionalidades para poder trabajar con MQTT.

```
python -m pip install -U pip
python -m pip install -U paho-mqtt
```

C3digo 6. L3neas que debemos introducir en el directorio de Python para descargar las librer3as de MQTT

El siguiente paso es escribir el programa que crea la base de datos. En primer lugar, crearemos una instancia de tipo cliente de la clase MQTT, que nos permita conectarnos al br3ker elegido (c3digo 7). Gracias a las librer3as instaladas tenemos tres “callbacks” que nos permiten controlar la conexi3n con el br3ker, “on-connect”, “on-message” y “on-disconnect”.

La primera de ellas nos permite suscribirnos al t3pico que queramos (c3digo 8). La segunda, al estar conectados como cliente, nos permite recibir los mensajes que se env3an al t3pico al que estemos suscritos (c3digo 9). Por 3ltimo, “on-disconnect” (c3digo 10) nos permite desconectarlos del br3ker y guardar los valores almacenados.

Una vez a3adidas estas tres funciones, solamente nos falta escribir una funci3n que cree una base de datos y almacene en el formato adecuado el contenido de los mensajes que se reciben en el t3pico al que estamos suscritos (c3digo 11). Para ello, crearemos un archivo

del tipo `.db` (“*data base file*”) y añadiremos los mensajes recibidos mediante SQLite3, que al ser “*server-less*”, no requiere instalar un servidor separado para trabajar con SQLite para que pueda conectarse directamente con la base de datos.

```
#Programa principal
mqttc = mqtt.Client() #Creamos una instancia de la clase MQTT para
                      #conectarnos al broker como cliente

# Asignamos eventos a los callbacks
mqttc.on_message = on_message
mqttc.on_connect = on_connect
try:
    # Inicializamos la conexión con el servidor
    mqttc.connect(MQTT_Broker,int(MQTT_Port),
                 int(Keep_Alive_Interval))
    print("Conectado al broker")
except:
    print("No se ha podido conectar")
    print("Cerrando")
    sys.exit()
```

Código 7. Programa principal en Python que crea una base de datos a partir de los mensajes recibidos por MQTT

```
#Nos suscribimos a los tópicos deseados
def on_connect(client, userdata, flags, rc):
    mqttc.subscribe(MQTT_Topic)
    print("Conectado al bróker con resultado: "+str(rc))
    #print((str(datetime.datetime.now().strftime("%c")) + ' El
    bróker está conectado'))
```

Código 8. Función on-connect

```
#Se reciben los mensajes que se envían al tópico y se almacenan en la
base de datos
def on_message(client, userdata, msg):
    print ("MQTT Topic:" + msg.topic)
    print ("Datos:" + str(msg.payload))
    #Añadimos la fecha en la que se recibe el mensaje
    now = datetime.datetime.now()
    fechaHora = now.strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S")
    datos = str(msg.payload)

    #auxDatos = datos.split("")
    #listaDatos = auxDatos[1].split(",")

    #print("Field 1:"+listaDatos[0])
    #print("Field 2:"+listaDatos[1])

    #Llamamos a la función que gestiona la base de datos
    dataToDB(dataHora, dades)
```

Código 9. Función on-message

```
# Función de desconexión
def on_disconnect(client, userdata, rc):
    if rc!=0:
        print("Desconexión inesperada")
    else:
        print("Desconectado correctamente")
```

```
return None
```

Código 10. Función on-disconnect

```
#Creamos la BD si no existe y añadimos el mensaje nuevo
def dataToDB(dataHora, field1):
    try:
        conn = sqlite3.connect(dbFile) #conectamos con el
                                         archivo .bd

        c = conn.cursor()
        print("Connected to database")

        c.execute("""CREATE TABLE IF NOT EXISTS mostres
(codiMostra INTEGER PRIMARY KEY autoincrement,dataHora TEXT NOT
NULL,field1 TEXT NOT NULL);""") #creamos la tabla si no existe

        sqlite_insert_with_param = """INSERT INTO
mostres(dataHora, field1) VALUES (?,?);""" #Añadimos el código EPC
escaneado y la fecha
        data_Tuple = (dataHora, field1)
        c.execute(sqlite_insert_with_param,data_Tuple)

        conn.commit()
        print("Data saved to database")

        c.close()
    except:
        print("Data can not be saved to database")
    finally:
        if(conn):
            conn.close()
```

Código 11. Función que gestiona la base de datos

De esta manera, se crea un archivo local de base de datos dónde se almacenan todos los códigos EPC escaneados y la fecha. Por último, para poder visualizar esta base de datos y realizar búsquedas filtrando en función de diferentes valores, se procedió a crear una rutina con MATLAB.

4.1.3 Búsqueda filtrada de los datos almacenados

La última parte del trabajo consiste, como ya se ha comentado anteriormente, en crear una rutina de MATLAB que permita abrir la base de datos creada y realizar búsquedas. El objetivo es desarrollar una aplicación que permita filtrar en función de la fecha o el código del escaneo. Se pretende simular una aplicación real, como podría ser utilizada en una tienda, donde se pueda buscar fácilmente si un producto ha sido vendido y en qué fecha, o si todavía se tiene existencias de ese producto en el almacén.

Para ello, en la rutina de MATLAB, abrimos la base de datos creada mediante SQLite, que permite realizar búsquedas en lenguaje SQL (*“Structured Query Language”*). A continuación, nos pide por pantalla que datos deseamos buscar (fecha, hora o código EPC escaneado) y seguidamente si queremos filtrar la búsqueda en función de algún valor (hora, día, mes o código EPC). Con esos datos, se forma la petición o *“query”* en lenguaje SQL. La estructura es la siguiente:

SELECT * FROM registro WHERE condición

Figura 42. Estructura de la sentencia de búsqueda. En azul, los datos que queremos obtener, puede ser la fecha de escaneo, el código EPC o todos si lo indicamos con un asterisco. En morado el nombre de la base de datos. En verde la condición que filtra los resultados si existe.

Fuente: Elaboración propia

Al inicializar el programa, en primer lugar, se pide el parámetro que se quiere buscar (fecha, hora o código del tag escaneado). A continuación, se permite introducir los filtros de búsqueda, es decir, si se muestran todos los resultados encontrados o solamente los escaneados en una hora, fecha o con un código determinado.

Por último, si la búsqueda ha dado resultado, se muestran por pantalla todos los registros escaneados que cumplen las condiciones anteriormente indicadas. A continuación, se muestran capturas del programa, donde se muestran todos los registros almacenados en la base de datos (figuras 43 y 44).

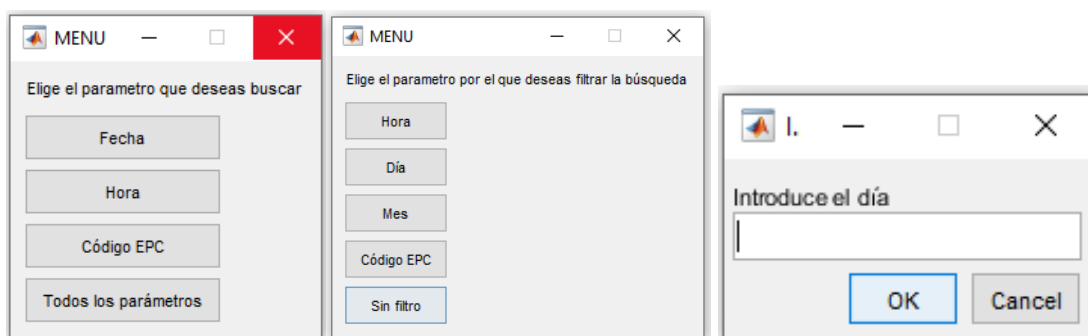


Figura 43. Imágenes de la rutina de MATLAB para introducir los filtros de búsqueda

Fuente: Elaboración propia

Día	Mes	Año	Hora	Minuto	Segundo	EPC
1 09	08	2021	11	58	34	11 11 11 11 EE EE EE EE EE EE EE 0D
2 09	08	2021	11	58	40	00 E2 00 80 03 20 8A 13 65 00 00 00
3 09	08	2021	11	58	47	00 E2 00 80 03 20 8A 13 65 00 00 00
4 09	08	2021	11	58	54	11 11 11 11 EE EE EE EE EE EE EE 0D
5 09	08	2021	11	59	00	00 E2 00 80 03 20 8A 13 65 00 00 00
6 09	08	2021	11	59	06	11 11 11 11 EE EE EE EE EE EE EE 0D
7 09	08	2021	11	59	12	00 E2 00 80 03 20 8A 13 65 00 00 00
8 09	08	2021	11	59	20	00 E2 00 80 03 20 8A 13 65 00 00 00
9 09	08	2021	11	59	26	00 E2 00 80 03 20 8A 13 65 00 00 00
10 09	08	2021	11	59	33	11 11 11 11 EE EE EE EE EE EE EE 0D
11 09	08	2021	19	03	32	11 11 11 11 EE EE EE EE EE EE EE 0D
12 09	08	2021	19	03	49	11 11 11 11 EE EE EE EE EE EE EE 0D

Figura 44. Resultado de la búsqueda de todos los registros en la base de datos

Fuente: Elaboración propia

Referencias

- [1] “SparkFun Simultaneous RFID Reader - M6E Nano”
<https://www.sparkfun.com/products/14066> (5 julio, 2021).
- [2] Descargando la API en la página de Sparkfun
mercuryapi-1.31.4.35\c\src\samples\ RegionConfiguration.c
- [3] Descargando la API en la página de Sparkfun
mercuryapi-1.31.4.35\c\src\api\ serial_reader_l3.c
- [4] Descargando la librería en la página de Sparkfun
SparkFun_Simultaneous_RFID_Tag_Reader_Library-master\src\SparkFun_UHF_RFID_Reader.c
- [5] Descargando la librería en la página de Sparkfun
SparkFun_Simultaneous_RFID_Tag_Reader_Library-master\src\SparkFun_UHF_RFID_Reader.h
- [6] THINGMAGIC NANO USER GUIDE
https://cdn.sparkfun.com/assets/4/e/5/5/0/SEN-14066_datasheet.pdf Página 43

(5 julio, 2021).

[7] UHF Antenna

<https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/FEIG%20Electronic%20PDFs/ID%20ISC.ANT.U250%20250-EU,%20FCC.pdf> (8 julio, 2021).

[8] Descargando la librería en la página de Sparkfun

SparkFun_Simultaneous_RFID_Tag_Reader_Library-master\examples\Example1_Constant_Read

[9] “Funcionamiento del MQTT”

<https://sg.com.mx/revista/51/hola-mundo-iot> (10 julio, 2021)

[10] “Python” <https://es.wikipedia.org/wiki/Python> (12 julio, 2021)

5. Conclusiones y líneas futuras

Los objetivos principales del trabajo eran, el estudio de la tecnología RFID, la implementación de un sistema de caracterización de tags de bajo coste y la simulación de una aplicación real de RFID. Dichos objetivos se han alcanzado con éxito a lo largo del presente proyecto.

En relación con el sistema de caracterización se pueden extraer diferentes conclusiones. En primer lugar, el diseño e implementación del sistema ha sido satisfactorio, ya que, como se puede comprobar, el programa creado funciona y cumple su función adecuadamente. Se ha conseguido caracterizar correctamente una serie de tags que, además, ha permitido extraer resultados y analizarlos para conocer el funcionamiento real de estas etiquetas.

Como futura mejora de este proyecto, sería la capacidad de escanear todas las frecuencias del espectro. Como ya se ha comentado, el propio firmware del lector no permitía el escaneo de todas las frecuencias para evitar interferencias. Por lo que, para acabar de perfeccionar el sistema, convendría o bien dotar al lector de la capacidad de escanear ese rango de frecuencias, o utilizar otro lector similar de bajo coste que no se encuentre capado.

Respecto a la simulación de la aplicación de RFID, también se han obtenido resultados positivos. El lector es capaz de escanear y gestionar una gran cantidad de tags simultáneamente. El programa diseñado para gestionar la base de datos funciona correctamente y las búsquedas se realizan con rapidez.

Las posibles mejoras de este sistema serían, en primer lugar, la utilización de un bróker privado. En este trabajo se ha utilizado un bróker público, por lo que si se quisiera realizar una implementación de una aplicación real de RFID convendría usar un bróker privado. En segundo lugar, las búsquedas filtradas en la base de datos podrían realizarse con otro lenguaje, de esa manera se obtendría un resultado más visual y efectivo.

El resto del proyecto ha sido llevado a cabo sin mayor problema, por lo que el resultado final es satisfactorio.