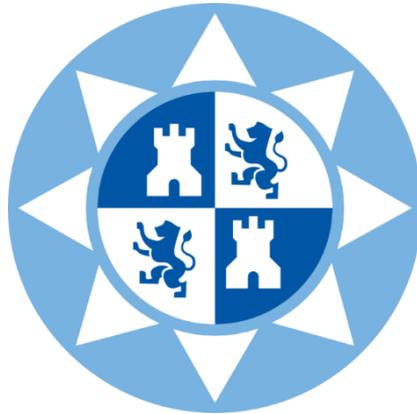


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



Trabajo Fin de Máster

**Cobertura radioeléctrica en una colmena de un
sistema RFID en la banda de UHF**

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicaciones



AUTOR: José Lorenzo López

DIRECTOR: Leandro Juan Llácer

Diciembre 2023

Abstract

Currently, locating the queen bee in a hive is done manually, with the beekeeper having to visualize and distinguish her from the rest of the bees. To do this, a drop of paint is usually placed on the thorax of the queen bee, although this does not prevent the process from being slow and can put the queen at risk if the combs are handled excessively.

In recent years, new techniques have been proposed to facilitate the process, including the placement of RFID microtags on the thorax of the queen bee. Until now, measurements could be made up to a few centimeters away, so placing the reader on the outside of the hive was a challenge, since the dimensions of the hive are larger than tens of centimeters.

In this work, a theoretical-experimental study of radio coverage of an RFID system based on an RFID reader and RFID microtags in the UHF band will be carried out when the reader is placed on the outside of a hive and the microtags inside the hive.

For this purpose, a link budget will be performed to delimit the maximum distance of the microtags in free space, and it will be experimentally tested.

Subsequently, it will be applied to the case of a real hive, carrying out a series of measurements both for an individual comb and for the hive as a whole, in order to observe its influence on the coverage.

The results have indicated that, on the one hand, the proposed link budget is suitable for free space. On the other hand, it has been shown that the microtag coverage is significantly increased within the hive, allowing the localization and identification of the queen bee as originally proposed.

Keywords

Queen hive, Link budget, RFID, Microtag, UHF

Resumen

Actualmente, la localización de la abeja reina en una colmena se realiza de forma manual, teniendo el apicultor que visualizarla y distinguirla del resto de abejas. Para ello, normalmente se coloca una gota de pintura en su tórax, aunque esto no evita que el proceso sea lento y pueda poner en riesgo a la reina si se manipulan excesivamente los panales.

En los últimos años se han propuesto nuevas técnicas que permitan facilitar el proceso, entre otras la colocación de microetiquetas o microtags RFID en el tórax de la abeja reina. Hasta ahora, las lecturas se podían realizar hasta unos pocos centímetros de distancia, por lo que colocar el lector en el exterior de la colmena suponía un reto, al ser las dimensiones de la colmena superiores a las decenas de centímetros.

En este trabajo se va a realizar un estudio teórico-experimental de cobertura radioeléctrica de un sistema RFID basado en un lector y microtags RFID en la banda de UHF cuando el lector se coloca en el exterior de una colmena y los microtags en el interior de la misma.

Para ello, se realizará un balance de enlaces que permita delimitar la distancia máxima de los microtags en espacio libre, y se comprobará de forma experimental.

Posteriormente, se aplicará al caso de una colmena real, realizando una serie de medidas tanto para un panal individual como para el conjunto de la colmena, y así observar su influencia en la cobertura.

Los resultados han indicado que, por un lado, el balance de enlaces propuesto es adecuado para espacio libre. Por otro lado, se ha demostrado que la cobertura de los microtag aumenta significativamente dentro de la colmena, lo que permite la localización e identificación de la abeja reina como se había planteado originalmente.

Palabras clave

Abeja reina, Balance de enlaces, RFID, Microtag, UHF

Índice

Índice de figuras	5
Índice de tablas	6
Listado de acrónimos	6
1. Introducción	7
1.1 Motivación	8
1.2 Estructura del trabajo	8
2. Sistemas RFID.....	9
2.1 Bandas de frecuencia.....	9
2.2 Lector	10
2.3 Etiqueta	12
3. Balance de enlaces	18
3.1 Modelo teórico.....	19
4. Estudio de cobertura.....	24
4.1 Equipos empleados.....	24
4.2 Cobertura en espacio libre	24
4.3 Cobertura en un panel aislado	31
4.4 Cobertura en el interior de una colmena	34
5. Conclusiones y líneas futuras	38
5.1 Conclusiones.....	38
5.2 Líneas futuras	39
6. Bibliografía.....	40
Anexos	42
Anexo I. Script MATLAB para modelo teórico	42
Anexo II. Script MATLAB para representación de medidas	45
Anexo III. Código C++ para medidas con el lector.....	47

Índice de figuras

Figura 2-1. Antena Keonn SP-11	10
Figura 2-2. Ensamblaje SolidWorks del lector	11
Figura 2-3. Lector RFID físico montado	11
Figura 2-4. Comparación tag grande y pequeño, vista frontal y trasera	12
Figura 2-5. Circuito equivalente del chip	13
Figura 2-6. Carta Smith tag grande, condensador 0,3pF	14
Figura 2-7. Carta Smith tag grande, condensador 0,4pF	14
Figura 2-8. Carta Smith tag grande, condensador 0,5pF	15
Figura 2-9. Carta Smith tag pequeño, condensador 0,3pF	15
Figura 2-10. Carta Smith tag pequeño, condensador 0,4pF	16
Figura 2-11. Carta Smith tag pequeño, condensador 0,5pF	16
Figura 3-1. Enlace descendente	18
Figura 3-2. Circuito equivalente del sistema transmisor-receptor RFID en campo cercano	19
Figura 3-3. Circuito RLC equivalente del tag	20
Figura 4-1. Distancias máximas teóricas según la reactancia de la antena, tag grande	25
Figura 4-2. Distancias máximas teóricas según la resistencia de la antena, tag grande	26
Figura 4-3. Representación tridimensional de la distancia máxima según resistencia y reactancia de la antena, tag grande	26
Figura 4-4. Distancia máxima para cada impedancia de antena, según condensador. Tag grande	27
Figura 4-5. Distancias máximas teóricas según la reactancia de la antena	28
Figura 4-6. Distancias máximas teóricas según la resistencia de la antena	28
Figura 4-7. Distancia máxima para cada impedancia de antena, según condensador. Tag pequeño	29
Figura 4-8. Panel de la colmena	31
Figura 4-9. Procedimiento de medida del tag en el panel	32
Figura 4-10. Valores RSSI según distancia, un solo panel, tag entre alambres	32
Figura 4-11. Valores RSSI según distancia, un solo panel, tag encima de un alambre	33
Figura 4-12. Colmena utilizada en las pruebas de cobertura	34
Figura 4-13. Procedimiento de medida en cámara anecoica	35
Figura 4-14. Colocación del tag en el panel	35
Figura 4-15. Valores RSSI según distancia, colmena entera, tag entre alambres	36
Figura 4-16. Valores RSSI según distancia, colmena entera, tag encima de un alambre	36

Índice de tablas

Tabla 1. Impedancia de las antenas de los tags según tamaño y condensador	17
Tabla 2. Parámetros empleados en el modelo teórico.....	23
Tabla 3. Resultados de cobertura máxima según tamaño del tag y valor del condensador.....	30

Listado de acrónimos

HF	High Frequency
IMSE	Instituto de Microelectrónica de SEvilla
RFID	Radio Frequency IDentification
RSSI	Radio Signal Strength Indicator
SHF	Super High Frequency
UHF	Ultra High Frequency
UPCT	Universidad Politécnica de Cartagena
UPV	Universidad Politécnica de Valencia

1. Introducción

Desde la antigüedad, los humanos han mantenido una relación muy estrecha con las abejas, al ser conscientes de la importancia de este insecto por sus beneficios para la agricultura y el medio ambiente. Tanto es así, que su cuidado y domesticación ha derivado en una profesión conocida como apicultura [1].

Un problema que surge a la hora de mantener una colmena es la identificación y localización de la abeja reina. Tradicionalmente, se ha realizado manualmente, extrayendo panal a panal e identificando a la abeja por contacto visual, que suele estar marcada con una gota de pintura en el tórax para poder ser distinguida del resto. Sin embargo, este proceso resulta lento, especialmente si se dispone de varias colmenas, ya que en una única colmena puede haber hasta 40000 abejas y ubicar entre 8 y 10 panales [2].

La identificación por radiofrecuencia (RFID, Radio Frequency IDentification en inglés) se utiliza para leer datos de forma inalámbrica en numerosos ámbitos, sea logística, facturación, biométricos, etc. Los sistemas RFID consisten en un lector y una etiqueta o transpondedor, llamado tag en inglés. El lector es un sistema activo, mientras que el tag puede ser tanto activo como pasivo, siendo los más populares estos últimos. Los sistemas RFID pueden trabajar en diversas bandas de frecuencia, aunque las más comunes son las de LF (125kHz), HF (13,56MHz) y UHF (de 860 a 960MHz) [3].

Las etiquetas RFID pueden reducirse de tamaño hasta llegar al orden de milímetros, y se han utilizado recientemente en la identificación de insectos, como son las abejas, a distancias de 1 o 2cm [4]. En estos casos, el lector suele colocarse en los conductos de entrada o salida de abejas de la colmena. Sin embargo, no son prácticos cuando el lector se encuentra fuera de la colmena, ya que sus dimensiones (54x46x30cm) requieren de un mayor alcance. Hasta el momento, no se han encontrado tags comerciales con dimensiones lo suficientemente pequeñas como para ser colocadas en el tórax de una abeja reina, y además proporcionar el suficiente alcance como para ser leídos desde el exterior de la colmena.

Este trabajo se enmarca en la acción B. Desarrollo del sistema de localización/identificación de la abeja reina del proyecto INNODEAPI. En dicha acción participan la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), el Instituto de Microelectrónica de Sevilla (IMSE) y la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) y tiene como objetivo ofrecer al apicultor una solución eficiente para la localización e identificación de la abeja reina de una colmena, sin necesidad de tener contacto visual con la misma [5]. INNODEAPI forma parte de la Medida 16.1 del programa Regional de Desarrollo Rural 2014-2020, financiado por la Consejería de Agua, Agricultura, Ganadería y Pesca de la Región de Murcia, y por el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural.

1.1 Motivación

En este trabajo se pretende demostrar que es posible identificar y localizar a una abeja reina en el interior de una colmena, utilizando tags de fabricación específica, con el lector situado en el exterior de la colmena.

Como ya se ha explicado, este estudio se encuentra en el contexto del proyecto INNODEAPI.

Además, el proyecto cuenta con la ayuda del Programa Investigo, financiado por fondos EU NextGeneration [6].

1.2 Estructura del trabajo

Este trabajo se divide en dos partes, tras una breve introducción con los aspectos generales de las comunicaciones RFID y nuestro caso específico.

En primer lugar, se desarrolla teóricamente un modelo de campo cercano para determinar la distancia máxima de cobertura del sistema en espacio libre. El estudio se basará en un modelo de inductancias que será aplicado a nuestro caso concreto.

Posteriormente, se realizará un estudio de cobertura que englobará tres casos diferentes. Por un lado, se realizarán las simulaciones con el modelo estudiado en la primera parte, y se comprobará la validez del mismo mediante medidas experimentales.

Por otro lado, se realizarán medidas de cobertura en un panel aislado, con el objetivo de observar algún posible aumento de la cobertura del tag debido a su estructura.

Finalmente, se observará la cobertura del sistema en una colmena completa, constituida de varios panales, para comprobar si aumenta o no la cobertura respecto al caso de emplear un único panel.

Por último se presentan las conclusiones principales del trabajo, así como la bibliografía y el anexo con todo el código utilizado.

2. Sistemas RFID

Los sistemas de identificación por radiofrecuencia (Radio Frequency IDentification, por sus siglas en inglés) son utilizados en la actualidad en numerosas aplicaciones, desde industria y logística hasta medicina y agricultura. La idea fundamental de esta tecnología es la detección de una serie de etiquetas o tags de forma inalámbrica, lo que permite conocer su situación.

La localización RFID puede trabajar en diferentes bandas de frecuencia, como se va a discutir a continuación, y por lo general consisten en un lector y una etiqueta o tag.

2.1 Bandas de frecuencia

Los sistemas RFID se pueden clasificar, entre otros criterios, según la banda de frecuencia en la que trabajen. Los más importantes se dividen en HF (High Frequency) RFID, UHF (Ultra High Frequency) RFID y SHF (Super High Frequency) RFID.

Los sistemas HF RFID funcionan en la banda de 135 kHz o 13.56 MHz, y su alcance varía entre los 10cm y 1m.

Por otro lado, los sistemas UHF RFID trabajan entre los 860 y los 960MHz, y ofrecen un alcance superior a 1m.

Por último, los sistemas SHF RFID se encuentran en la banda de microondas, entre 2.5 GHz y 5.8 GHz. Son los que ofrecen un mayor alcance, pero su coste es considerablemente superior al resto de alternativas.

Para el trabajo se ha tomado la banda de RFID UHF.

2.2 Lector

El lector en un sistema RFID consta de una antena transmisora que, mediante un elemento de control como puede ser un microprocesador, se envía una señal a todas las etiquetas dentro de su alcance, las cuales además enviarán otra señal que será recibida y decodificada por el lector.

Para nuestro caso de estudio, el lector consiste en un sistema electrónico conformado por una serie de módulos, los cuales son gobernados por un microcontrolador ESP32. El módulo lector es un CAEN Hadron, que funciona en la banda de UHF y tiene una potencia máxima de transmisión de 31,5dBm. Este se conecta a la antena lectora, que se trata de una Keonn SP-11 (Figura 2-1), comúnmente utilizada para drones RFID. Además, el lector cuenta con un display digital que permite visualizar información de interés.



Figura 2-1. Antena Keonn SP-11

Las piezas en las que se ha montado el lector han sido fabricadas mediante el programa SolidWorks, consistiendo en una base, asa, marco para colocar la antena lectora y dos placas de soporte, una para la pantalla y otra para los componentes electrónicos. El montaje de las piezas en SolidWorks se observa en la Figura 2-2.

El lector ensamblado con todos los componentes se puede observar en la Figura 2-3.

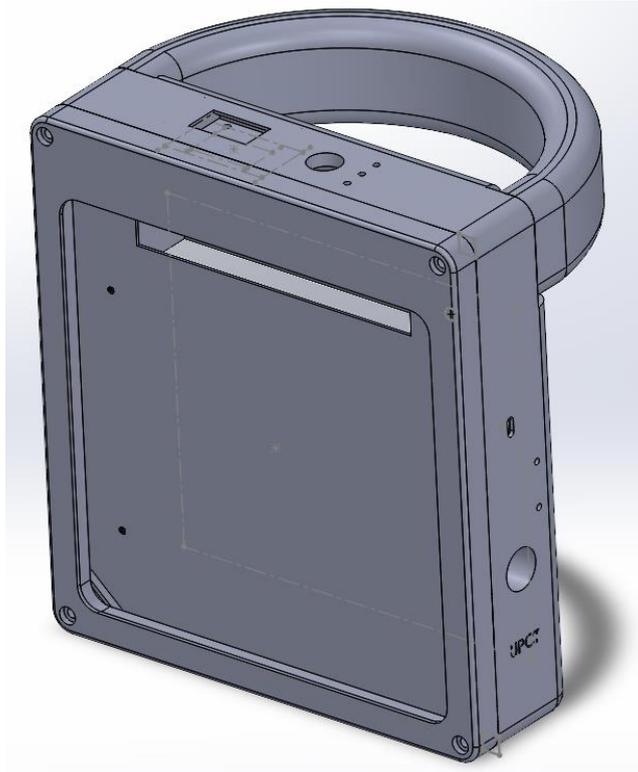


Figura 2-2. Ensamblaje SolidWorks del lector



Figura 2-3. Lector RFID físico montado

2.3 Etiqueta

La etiqueta o tag en un sistema RFID recibe la señal del lector y transmite otra señal para comunicarse con éste nuevamente. Según cómo se genere esta segunda señal, el tag puede ser tanto activo (si requiere de alimentación para generarla) como pasivo (si la señal es capaz de generarse únicamente a partir de la potencia de la señal incidente, sin necesidad de alimentación externa), aunque es más común este último tipo. Los tags pasivos se componen, por lo general, de una antena receptora y un microchip que modula la señal de entrada y la reenvía al lector mediante el efecto backscatter.

Para nuestro caso de estudio, las etiquetas son de tipo pasivo, y están compuestas por el chip Impinj MonzaR6, el cual contiene el transpondedor de datos LXMS21ACMF-218, sugerido por el Instituto de Microelectrónica de Sevilla (IMSE) debido a sus prestaciones [7], y una microantena desarrollada por la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), fabricada por la empresa LabCircuits. La antena consta de una espira de 3 vueltas, de forma cuadrada. Hay dos tamaños de antena que determinan las dos dimensiones posibles de las etiquetas: 3mm x 3mm (pequeño) y 3mm x 4mm (grande).

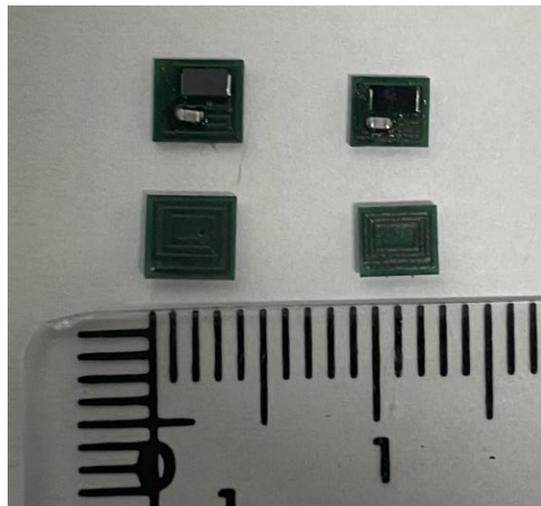


Figura 2-4. Comparación tag grande y pequeño, vista frontal y trasera

La impedancia de entrada que ofrece el chip a los 868MHz puede ser calculada según su datasheet. Como podemos apreciar en la Figura 2-5, su circuito equivalente consiste en una resistencia y dos condensadores en paralelo [8], siendo C_{mount} la capacidad parásita y C_p la capacidad equivalente del transpondedor de datos.

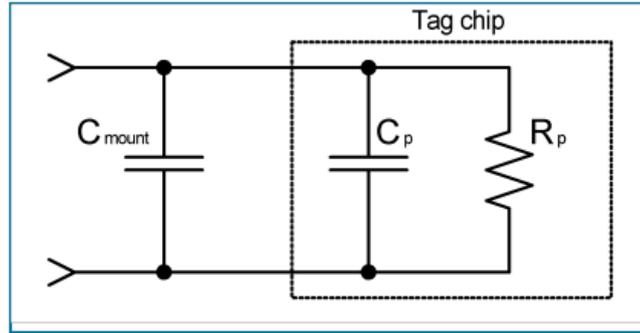


Figura 2-5. Circuito equivalente del chip

Estos condensadores y la resistencia, al estar en paralelo, conforman un condensador equivalente cuya admitancia será:

$$Y_{chip} = \frac{1}{R_p} + j\omega(C_p + C_{mount}) \quad (1)$$

Por tanto, la impedancia es:

$$Z_{chip} = \frac{1}{Y_{chip}} \quad (2)$$

Y sustituimos la ecuación (1) en (2):

$$Z_{chip} = \frac{1}{\frac{1}{R_p} + j\omega(C_p + C_{mount})} = \frac{\frac{1}{R_p} - j\omega(C_p + C_{mount})}{\left(\frac{1}{R_p}\right)^2 + \omega^2(C_p + C_{mount})^2} \quad (3)$$

Donde además, a 868MHz el datasheet nos indica que:

$$R_p = 1200\Omega \quad (4)$$

$$C_p = 1,23pF \quad (5)$$

$$C_{mount} = 0,21pF \quad (6)$$

$$\omega = 2\pi \cdot 868 \cdot 10^6 Hz \quad (7)$$

Y finalmente podemos calcular:

$$Z_{chip} = 13,4 - j126\Omega \quad (8)$$

Por otro lado, la antena de la etiqueta también cuenta con una impedancia equivalente. Sin embargo, en la etapa de diseño se demostró que, para conseguir una mejor adaptación con la impedancia del chip, era necesario incluir un condensador en serie entre la antena y el chip. De esta forma, la impedancia total de la antena, junto con el condensador, tiene como resultados las cartas de Smith que pueden observarse para la etiqueta grande de la Figura 2-6 a la Figura

2-8, y el tamaño pequeño de la Figura 2-9 a la Figura 2-11. Estas medidas han sido realizadas por la UPV.

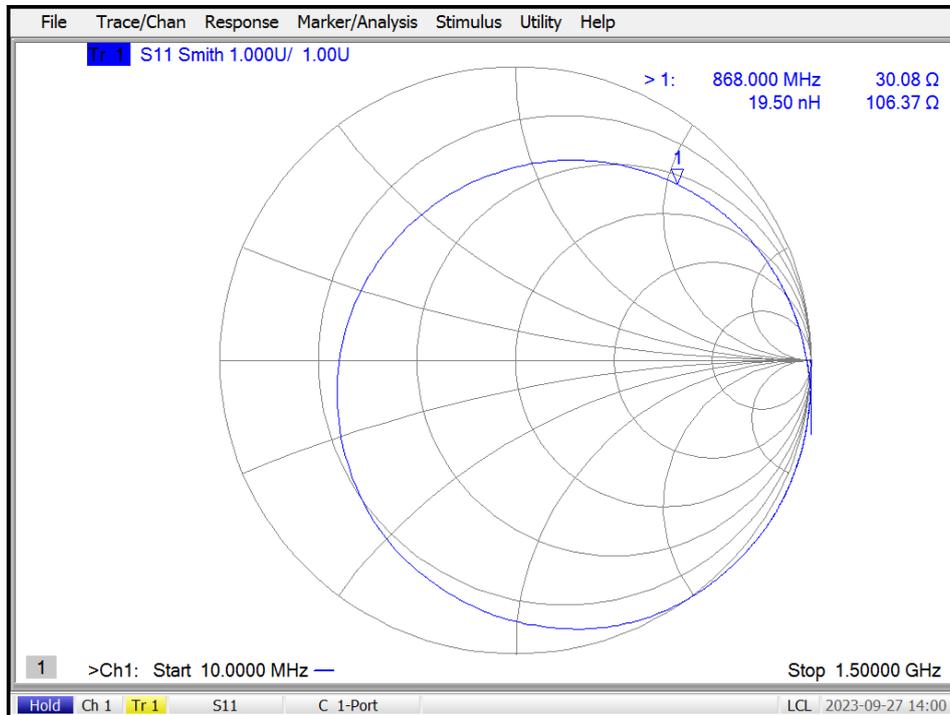


Figura 2-6. Carta Smith tag grande, condensador 0,3pF

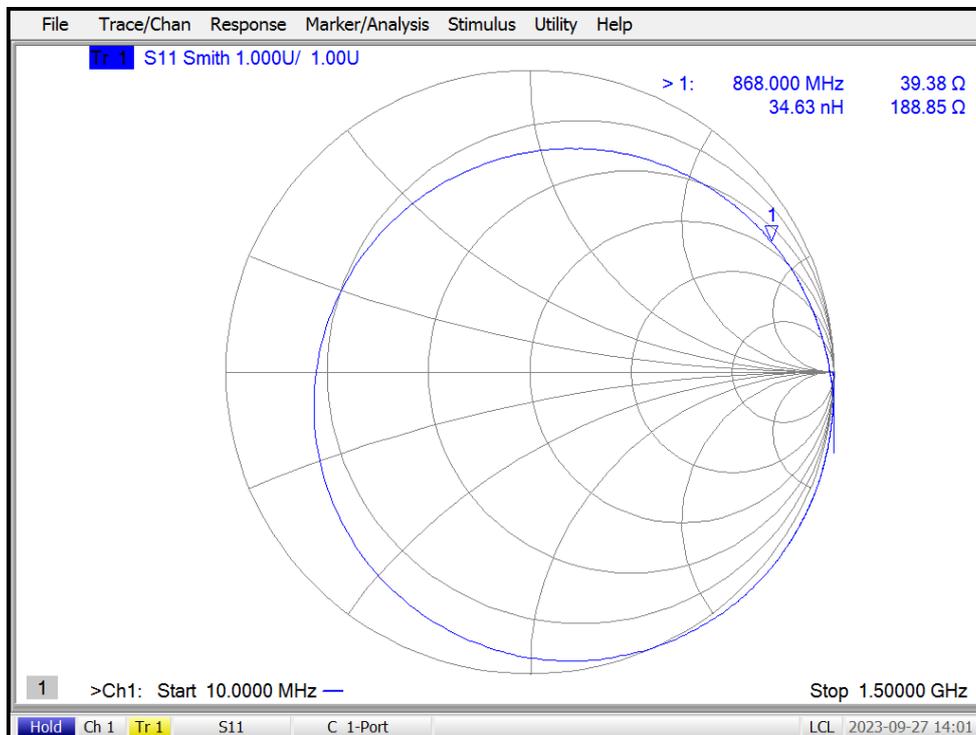


Figura 2-7. Carta Smith tag grande, condensador 0,4pF

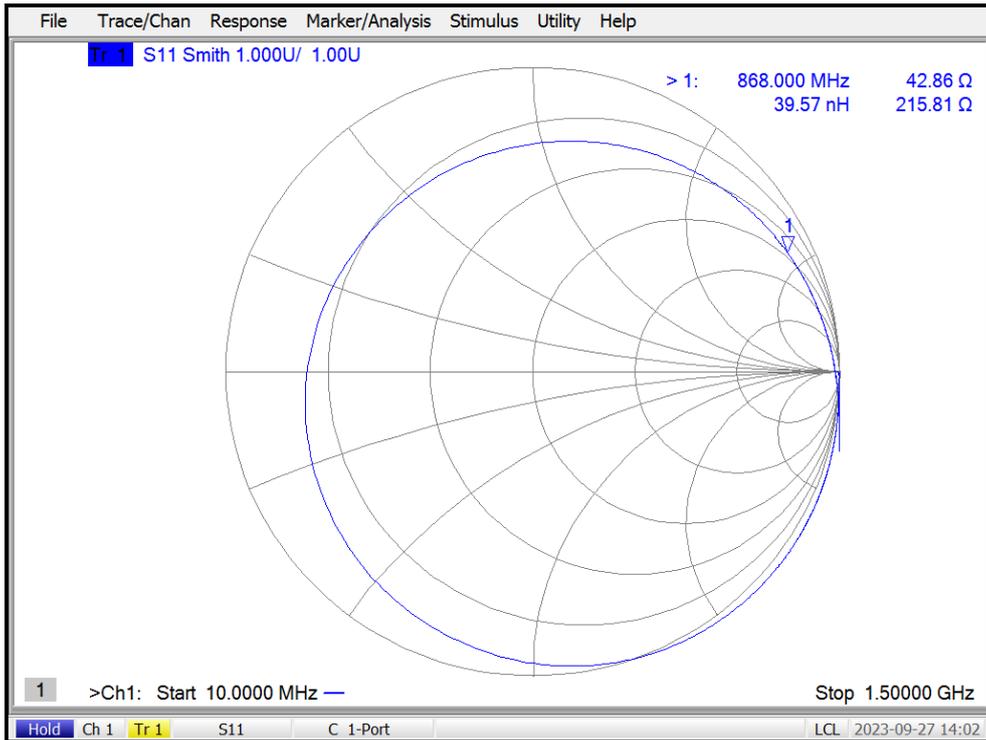


Figura 2-8. Carta Smith tag grande, condensador 0,5pF

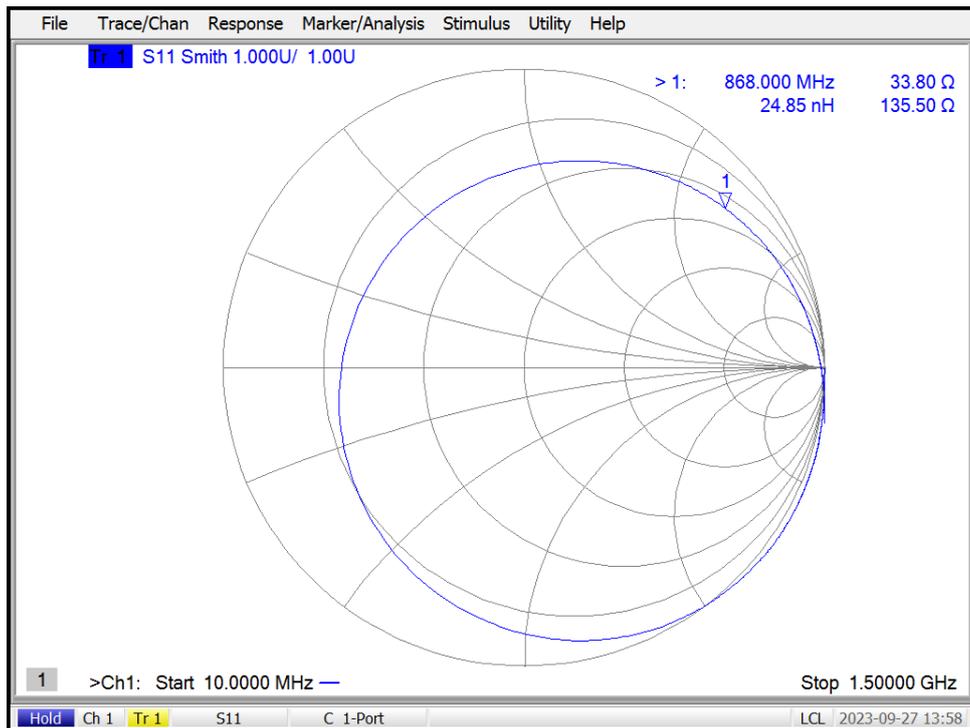


Figura 2-9. Carta Smith tag pequeño, condensador 0,3pF

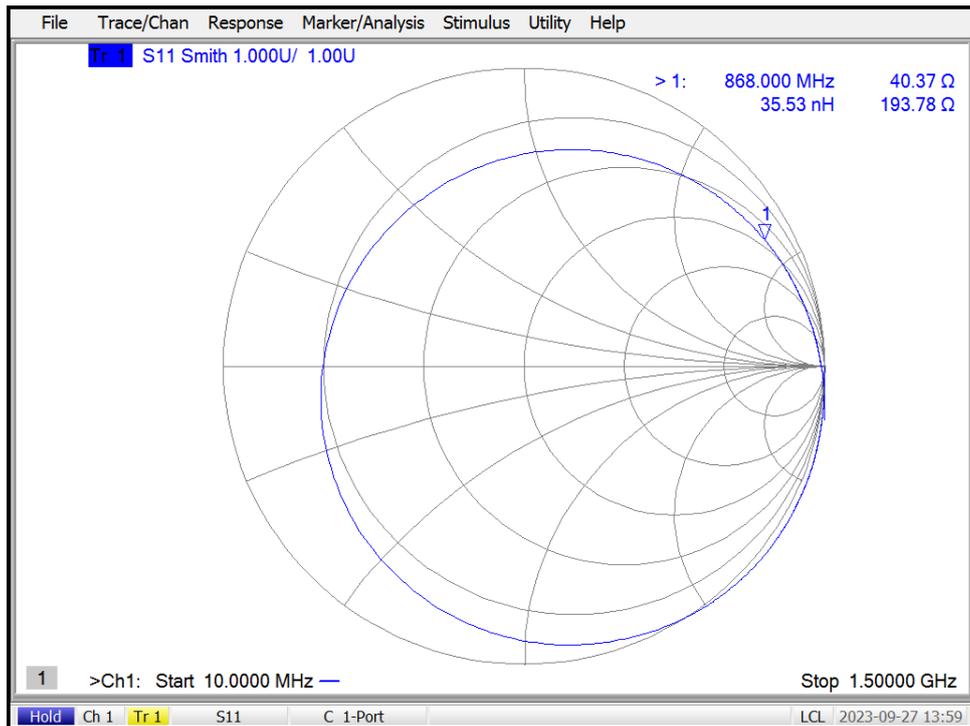


Figura 2-10. Carta Smith tag pequeño, condensador 0,4pF

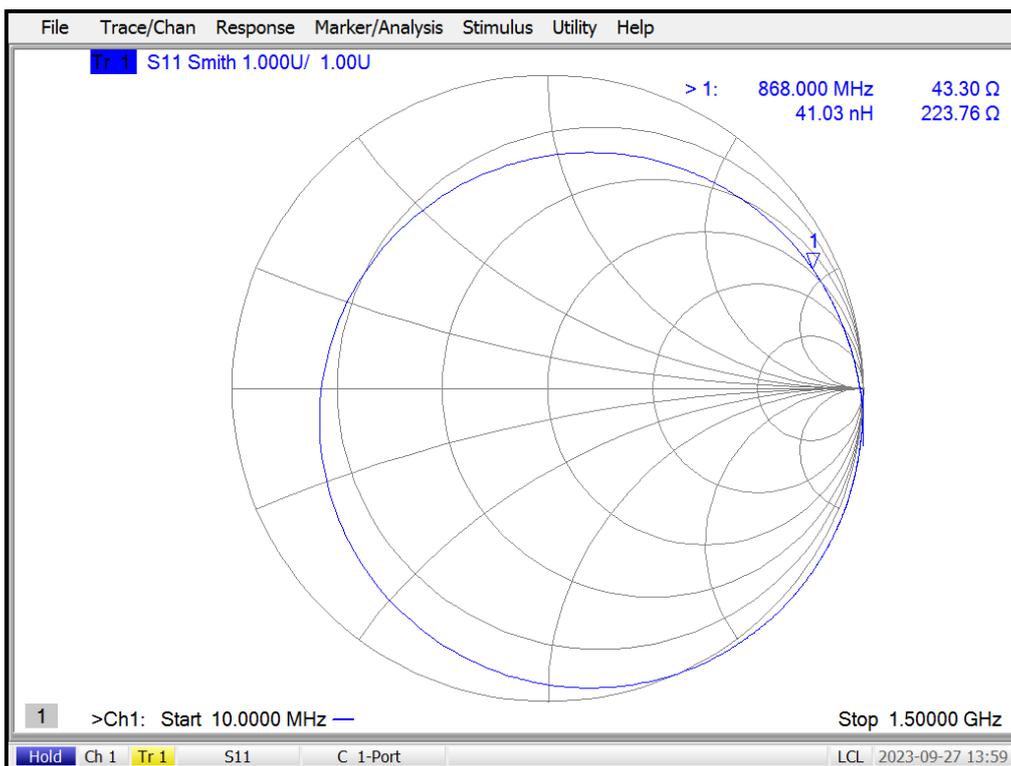


Figura 2-11. Carta Smith tag pequeño, condensador 0,5pF

Como podemos apreciar, las impedancias son más cercanas al complejo conjugado de la del chip (máxima transferencia de potencia) en la Figura 2-6 para el tag grande, con 0,4pF y en la Figura 2-10 para el pequeño, con una capacidad de 0,3pF.

Podemos ver todas las impedancias de la antena según el valor del condensador y el tamaño del tag en la Tabla 1.

Tamaño del tag	Condensador (pF)	Impedancia de la antena (Ω)
Grande	0,3	30,08 + j106,37
Grande	0,4	39,38 + j188,85
Grande	0,5	42,86 + j215,81
Pequeño	0,3	33,80 + j135,50
Pequeño	0,4	40,37 + j193,78
Pequeño	0,5	43,30 + j223,76

Tabla 1. Impedancia de las antenas de los tags según tamaño y condensador

3. Balance de enlaces

La comunicación en un sistema RFID se da cuando, en primer lugar, llega la suficiente potencia del lector al chip del tag para que se active (enlace descendente) y, en segundo lugar, cuando la potencia que refleja el tag es lo suficientemente alta como para ser detectada en el lector a una cierta distancia (enlace ascendente).

El enlace ascendente suele abordarse como un problema de radar monoestático, donde la sección recta radar se asocia con la modulación backscatter del tag [9]. Sin embargo, [10] demuestra que por lo general no supone el enlace más restrictivo, por lo que únicamente tendremos en cuenta el enlace descendente.

Tendremos la configuración que se muestra en la Figura 3-1, donde el transmisor será el lector RFID y el receptor será el tag.

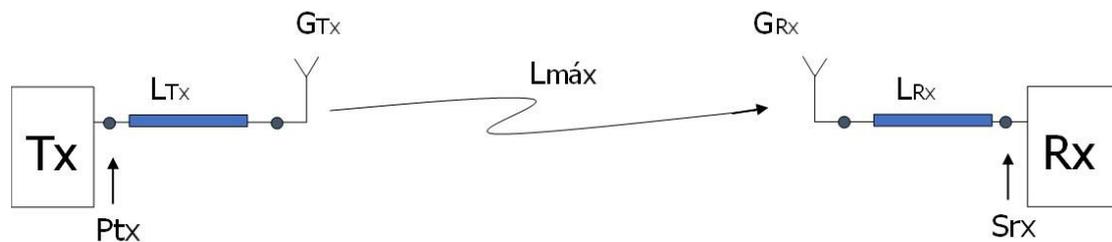


Figura 3-1. Enlace descendente

Los modelos para realizar el balance de enlaces, por lo general, asume campo lejano, por lo que la distancia máxima se puede despejar mediante la fórmula de Friis [11]. Sin embargo, en nuestro caso particular, nos encontraríamos en campo cercano, debido a la dimensión de la antena del sistema lector, así como las distancias de lectura. Esto lo podemos demostrar calculando la distancia de Fraunhofer [12]:

$$D_f = \frac{2D^2}{\lambda} = \frac{2 \cdot 0.21^2}{\frac{3 \cdot 10^8}{868 \cdot 10^6}} = 0,2552(m) \quad (9)$$

Vemos que ésta es del orden de decenas de centímetros, siendo las distancias típicas de lectura en nuestro caso menores o en torno a dicha distancia. Por tanto, tendremos que considerar modelos de campo cercano para el balance.

3.1 Modelo teórico

El modelo [13] que vamos a considerar para el cálculo de la distancia máxima del sistema en el enlace descendente asume una serie de situaciones. Por un lado, tanto la antena del transmisor como la del receptor consistirán en dos bobinas, las cuales tendrán una determinada inductancia mutua, que hará que una de ellas pueda recibir la potencia de entrada de la otra. Por otro lado, se considera que las ganancias de antena transmisora y receptora son iguales al factor de calidad de los circuitos RLC equivalentes, y de forma similar las pérdidas de transmisión serán proporcionales al factor de acoplamiento mutuo. Además, las pérdidas aumentan de manera exponencial con exponente 6 respecto a la distancia, condición que se da en campo cercano [12]:

$$E, H \propto \frac{1}{r^3} \rightarrow P \propto \frac{1}{r^6} \quad (10)$$

Este modelo, como se ha explicado, se aplica cuando la antena del transmisor y la del receptor consisten en bobinas reales, por lo que habrá que hacer una particularización para nuestro caso de estudio.

En primer lugar, tomaremos la antena del lector como una bobina de una determinada inductancia y una única vuelta, de diámetro 21cm. Además, consideraremos la frecuencia de resonancia como 868MHz, por lo que es necesario añadir un condensador que convierte el lector en un circuito RLC.

Por otro lado, el tag tendrá que consistir en otro circuito RLC, donde habrá un condensador y una bobina, encargados de resonar a la frecuencia indicada. La bobina tendrá 3 vueltas y diámetros 4mm (grande) y 3mm (pequeño). Además, se añaden dos impedancias: la impedancia de la antena y la impedancia del chip. En la Figura 3-2 se muestra el circuito completo.

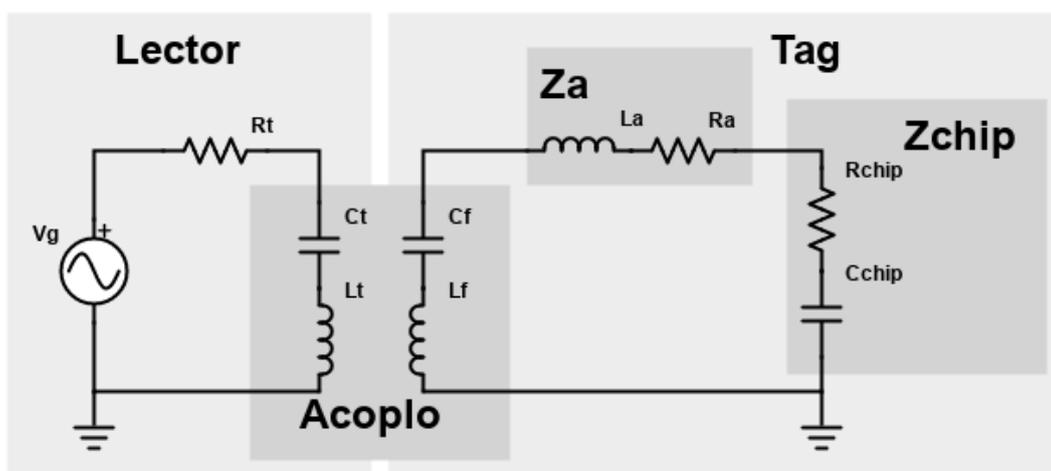


Figura 3-2. Circuito equivalente del sistema transmisor-receptor RFID en campo cercano

Sabemos que se puede calcular la inductancia teórica de una bobina a partir de una serie de parámetros físicos, según (11).

$$L_f, L_t = \frac{\mu \cdot A \cdot N^2}{l + 0,9r} \quad (11)$$

Donde μ es la permeabilidad magnética del medio, A es el área de la antena, N es el número de vueltas de la espira, l es la longitud total y r es el radio de la bobina.

Consideraremos la permeabilidad magnética del aire:

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} (H/m) \quad (12)$$

Asumiendo que ambas antenas son cuadradas, su área será igual al cuadrado de sus lados, que por conveniencia tomaremos como el doble de sus radios equivalentes:

$$A = (2r)^2 = 4r^2 \quad (13)$$

Y de esta forma podemos despejar el condensador físico equivalente que hace que el circuito resuene a la frecuencia especificada.

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \rightarrow C = \frac{1}{\omega^2 \cdot L} \quad (14)$$

De esta forma, se ha conformado un circuito RLC para el lector y el tag que en la frecuencia de resonancia tiene impedancia real, ya que la parte imaginaria se cancela. Sin embargo, la antena del tag cuenta con una reactancia no nula en la frecuencia de resonancia, de carácter inductivo, a la que hay que añadir la impedancia del microchip que compone el circuito total, conformando el circuito equivalente de la Figura 3-3. En el caso del lector, ya teníamos este circuito conformado por L_t , C_t y R_t .

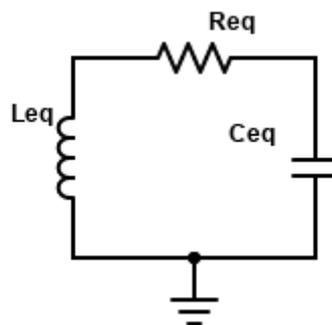


Figura 3-3. Circuito RLC equivalente del tag

Por tanto, para el caso del tag, los valores de inductancia y capacidad equivalente se pueden calcular como:

$$L_{eq} = L_f + L_{ant} = L_f + \frac{X_{ant}}{\omega} \quad (15)$$

$$C_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{C_f} + \frac{1}{C_{chip}}} = \frac{1}{\frac{1}{C_f} + \omega X_{chip}} \quad (16)$$

Este desajuste de impedancias provoca un cambio en la frecuencia de resonancia real del circuito RLC, que ya no será la que habíamos considerado anteriormente. Calculamos el factor de calidad del circuito equivalente, según (18). Para el caso del lector también utilizaremos esta expresión, aunque tomando la frecuencia de resonancia original.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{eq} \cdot C_{eq}}} \quad (17)$$

$$Q = \frac{\omega_0 L_{eq}}{R} \quad (18)$$

Además, el modelo teórico estudiado considera la potencia del receptor, en nuestro caso el tag, como la que es entregada por la antena, pero no tiene en cuenta la adaptación de impedancias entre la microantena y el chip. Por tanto, introducimos un coeficiente de transmisión de potencia, que se define como [14]:

$$\tau = \frac{P_{chip}}{P_{ent}} \rightarrow P_{chip} = P_{ent} \cdot \tau \quad (19)$$

Donde P_{chip} será igual a la sensibilidad del chip, cuando nos encontremos en el punto de distancia máxima de cobertura. Además:

$$\tau = 1 - |\rho|^2 \quad (20)$$

Siendo el coeficiente de reflexión definido de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{Z_{chip} - Z_a^*}{Z_{chip} + Z_a} \quad (21)$$

Donde Z_a es la impedancia de la antena y Z_{chip} es la impedancia del chip.

Finalmente, calculamos la distancia máxima del enlace con la expresión [13]:

$$d = 10^\beta \quad (22)$$

$$\beta = \frac{P_{log} + \tau_{log} + \eta + Q + 20\log_{10}\pi + 30\log_{10}r_t r_r}{60} \quad (23)$$

Considerando:

$$P_{log} = 10\log_{10}P_t - 10\log_{10}P_{ent} \quad (24)$$

Donde P_t es la potencia del lector. Además, tomamos el coeficiente de transmisión de potencia:

$$\tau_{log} = 10\log_{10}\tau \quad (25)$$

Y por último aparece un término de eficiencia de radiación η . Este término se puede tomar como [15]:

$$\eta = 10\log_{10}\eta_t\eta_r \quad (26)$$

Y además la eficiencia de cada una de las antenas será:

$$\eta_t, \eta_r = \frac{R_{(t,r)}}{R_{(t,r)} + R_{L(t,r)}} \quad (27)$$

Tomando $R_{L(t,r)}$ como la resistencia de la inductancia equivalente. Este valor, al ser despreciable frente a la resistencia $R_{(t,r)}$ equivalente de la antena, hace que finalmente la eficiencia quede como:

$$\eta_t, \eta_r \cong 1 \rightarrow \eta = 0(dB) \quad (28)$$

Además, la bibliografía nos presenta un segundo modelo [16], más restrictivo, que relaciona la potencia con la considerada en el anterior de la siguiente forma:

$$P_{log2}(dBm) = P_{log1}(dBm) - F(dB) \quad (29)$$

Donde el factor F se define como:

$$F = 10\log_{10} \frac{\omega \cdot \mu}{N_r^2 \cdot R_0} \quad (30)$$

El número de vueltas de la bobina equivalente de la antena receptora es:

$$N_r = 3 \text{ vueltas} \quad (31)$$

Y como resistividad se tomará la del cobre.

$$R_0 = 0,216(\Omega/m) \quad (32)$$

Por tanto, podemos calcular el factor como:

$$F = 10 \log_{10} \frac{2\pi \cdot 868 \cdot 10^6 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{3^2 \cdot 0,216} = 25,4721(dB) \quad (33)$$

Más adelante, utilizaremos los dos modelos para estimar la distancia máxima de cobertura del tag. Tomaremos el modelo optimista como cota máxima y el restrictivo como cota mínima de cobertura.

Los parámetros físicos que tomaremos para hacer los cálculos se muestran en la Tabla 2.

Parámetro	Símbolo	Valor
Radio de antena del lector	r_t	105 (mm)
Radio de antena del tag	r_r	2 (mm) (grande) 1,5 (mm) (pequeño)
Impedancia del chip	Z_{chip}	13,4 - j126 (Ω)
Número de vueltas de la microantena del tag (bobina equivalente)	N_r	3 vueltas
Número de vueltas de la antena del lector (bobina equivalente)	N_t	1 vuelta
Resistividad del cobre	R_0	0,216 (Ω/m)
Frecuencia de resonancia	f	868 (MHz)
Sensibilidad del tag	P_{chip}	-22 (dBm)
Potencia de transmisión del lector	P_t	31,5 (dBm)
Permeabilidad magnética del aire	μ	$4\pi \cdot 10^{-7}$ (H/m)

Tabla 2. Parámetros empleados en el modelo teórico

4. Estudio de cobertura

En esta sección, se van a realizar una serie de pruebas de distancia máxima para comprobar la cobertura que ofrece el sistema RFID. En concreto, primero se realizarán pruebas en espacio libre, para comprobar la validez del modelo teórico presentado en la sección 3.1. Después, se medirá la cobertura en un panel aislado, para así observar la influencia que ofrecen los alambres que componen su estructura, y finalmente se observará el caso de una colmena completa, compuesta de 10 panales.

Se describirán los equipos utilizados en las pruebas, y para el caso del espacio libre se realizará una simulación mediante el programa MATLAB, con el fin de determinar gráficamente esta distancia máxima.

4.1 Equipos empleados

Los equipos empleados en las pruebas de cobertura consisten en el lector RFID y las etiquetas RFID, y nos encontraremos en la banda UHF.

El lector, detallado en la sección 2.2, consta de un microprocesador ESP32, el cual ha sido programado con un script de C++. Este script genera una tabla donde cada fila corresponde con una determinada distancia, y se muestra el valor medio de intensidad de señal recibida del tag. Gracias a esto, podemos saber si el tag ha sido detectado o no, con lo que podremos determinar su cobertura máxima. El script se encuentra completo en el Anexo III. Código C++ para medidas con el lector.

Las etiquetas, tal y como se explicó en la sección 2.3, consisten en una microantena desarrollada por la UPV y en un microchip de datos, que identifica inequívocamente a cada tag. Estas etiquetas cuentan además con un condensador acoplado para conseguir una mejor adaptación de impedancias.

4.2 Cobertura en espacio libre

Para estudiar la cobertura del sistema en espacio libre, realizaremos una serie de simulaciones a partir de un script de MATLAB, que implementa el procedimiento del modelo teórico descrito en la sección 3.1. El código está disponible en el Anexo I. Script MATLAB para modelo teórico.

El modelo teórico considera dos situaciones, una más restrictiva y otra más optimista, como se vio en la sección 3.1. Por tanto, mediante la simulación de ambas podremos acotar una distancia máxima y mínima entre las cuales se encontraría el punto máximo de cobertura del tag.

Las variables de estudio serán la parte real e imaginaria de la antena del tag. Por tanto, representaremos la distancia máxima de cada modelo según el valor de resistencia y reactancia de la antena del tag, y por último se estudiará en una gráfica conjunta en tres dimensiones.

Los parámetros físicos han sido tomados de la Tabla 2, y se ha calculado el modelo optimista según (23), y el restrictivo según (29).

En primer lugar, se va a considerar el tag grande, cuya dimensión máxima es de 4mm. Obtenemos los resultados de cobertura en la Figura 4-1 en función de la reactancia y en la Figura 4-2 en función de su resistencia.

Como se puede apreciar, para el caso de la reactancia, la distancia máxima de cobertura se da cuando equivale al valor opuesto de la reactancia del chip, que es de 126 Ohmios. En este caso es cuando se cumple la condición de máxima transferencia de potencia, que se da cuando la impedancia de la antena coincide con el complejo conjugado de la del chip.

Sin embargo, para el caso de la resistencia vemos que, aunque en el caso donde ésta es igual a la del chip hay un valor alto de cobertura, es máxima para un valor más pequeño de resistencia. Por tanto, vemos que se da un compromiso entre máxima transferencia de potencia y factor de calidad del circuito.

Por último, en la Figura 4-3 apreciamos la representación tridimensional de la distancia máxima de cobertura respecto a la impedancia de la antena.

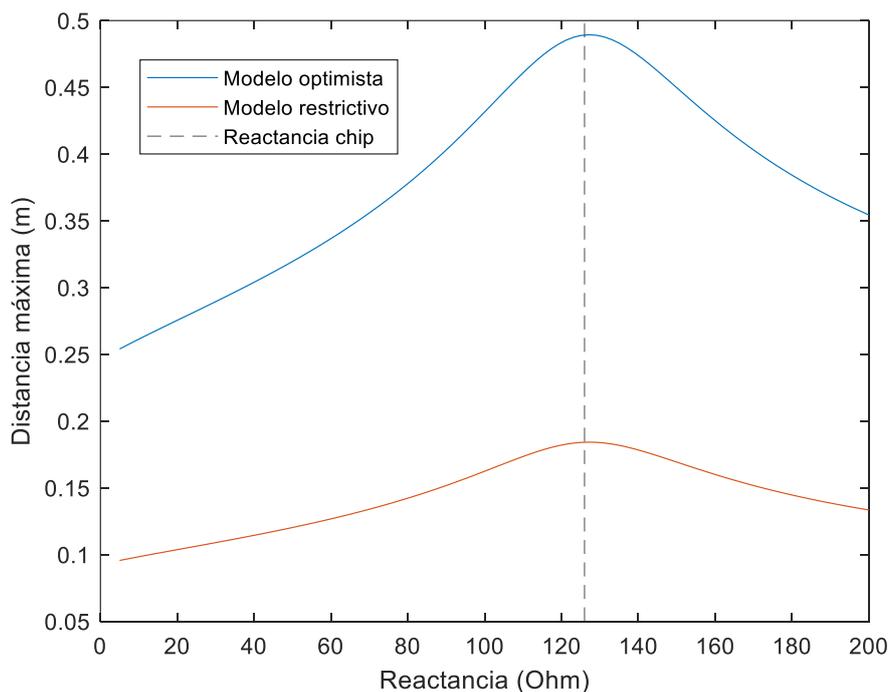


Figura 4-1. Distancias máximas teóricas según la reactancia de la antena, tag grande

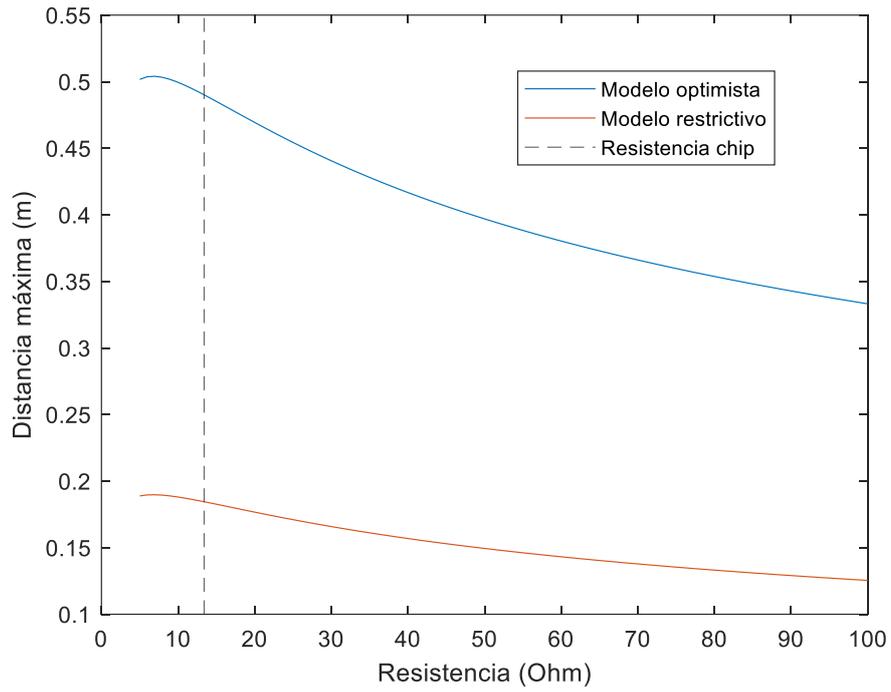


Figura 4-2. Distancias máximas teóricas según la resistencia de la antena, tag grande

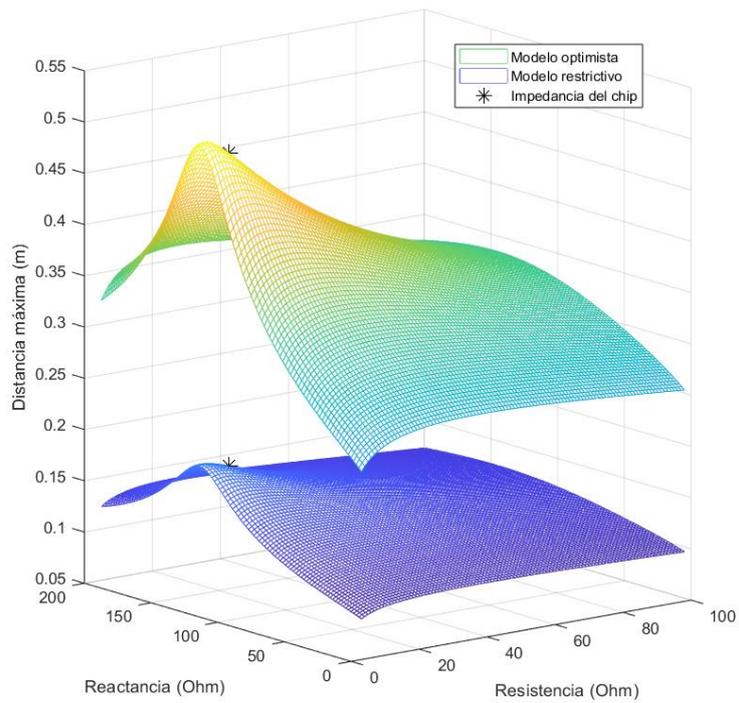


Figura 4-3. Representación tridimensional de la distancia máxima según resistencia y reactancia de la antena, tag grande

De este modo, observamos los dos fenómenos descritos anteriormente en su conjunto, donde el punto de mayor cobertura se corresponde con el de impedancia conjugada del chip, pero una menor resistencia real.

Por último, se van a representar tres impedancias distintas correspondientes a los tags grandes con tres valores distintos de condensador, partiendo de la Tabla 1. Podemos observar que la mayor cobertura está entre los valores de 0,3 y 0,4pF, mientras que el de 0,5pF ofrece una menor cobertura.

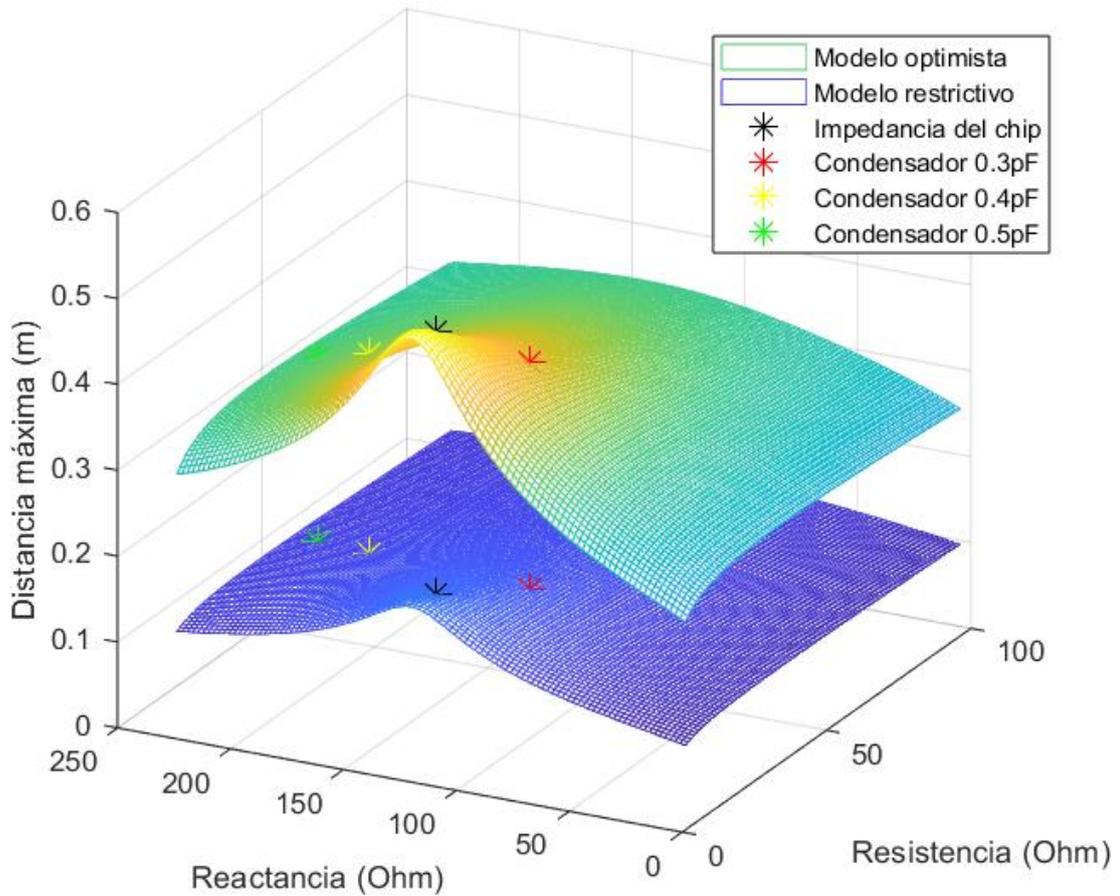


Figura 4-4. Distancia máxima para cada impedancia de antena, según condensador. Tag grande

En las siguientes figuras, se muestra esta misma simulación para el caso del tag pequeño, con los mismos valores de condensador y las impedancias de la Tabla 1.

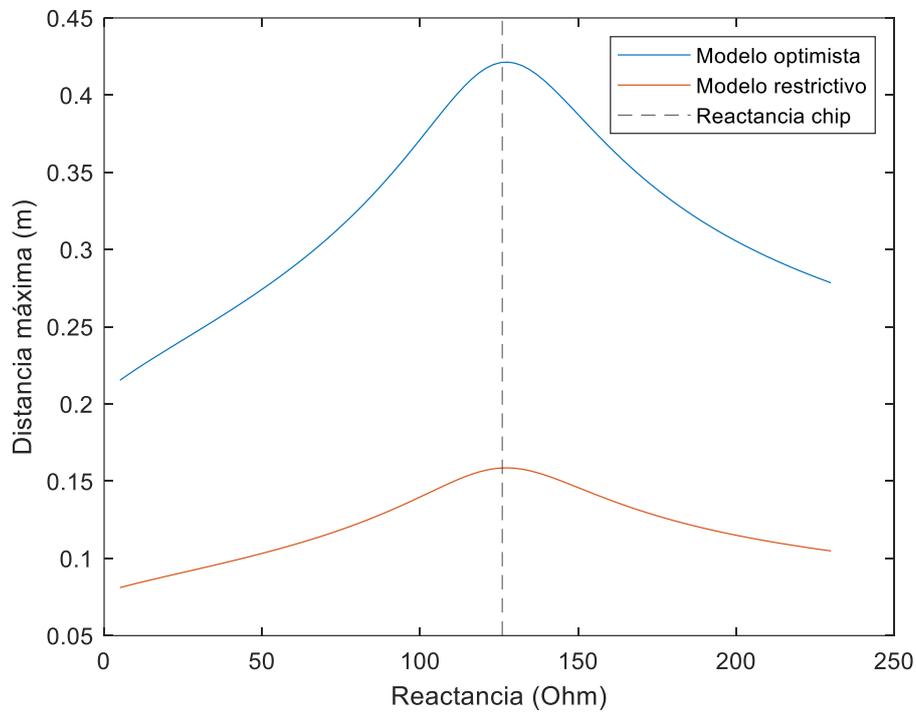


Figura 4-5. Distancias máximas teóricas según la reactancia de la antena

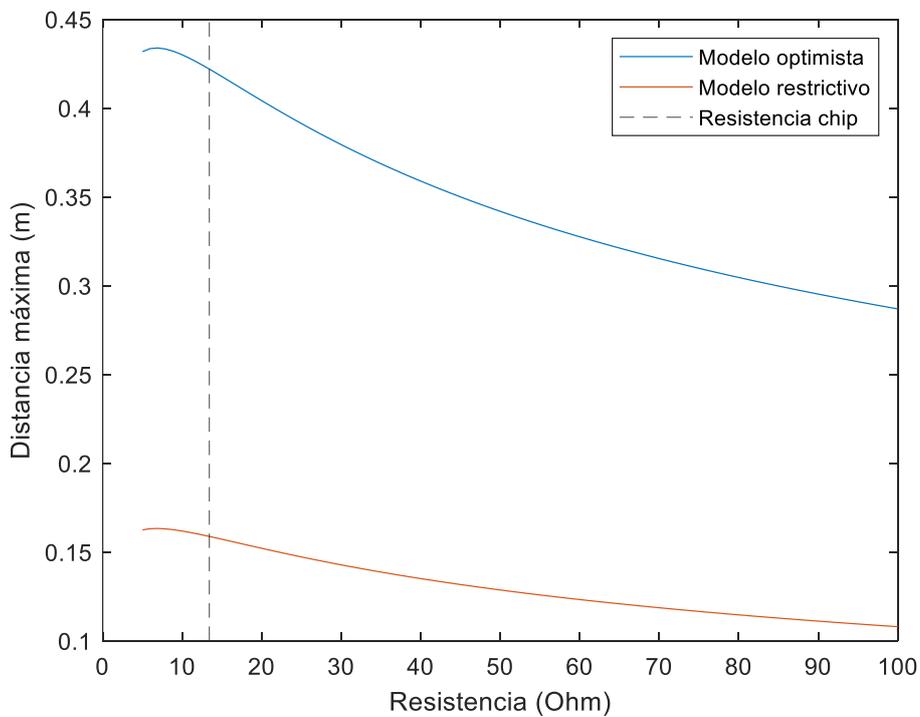


Figura 4-6. Distancias máximas teóricas según la resistencia de la antena

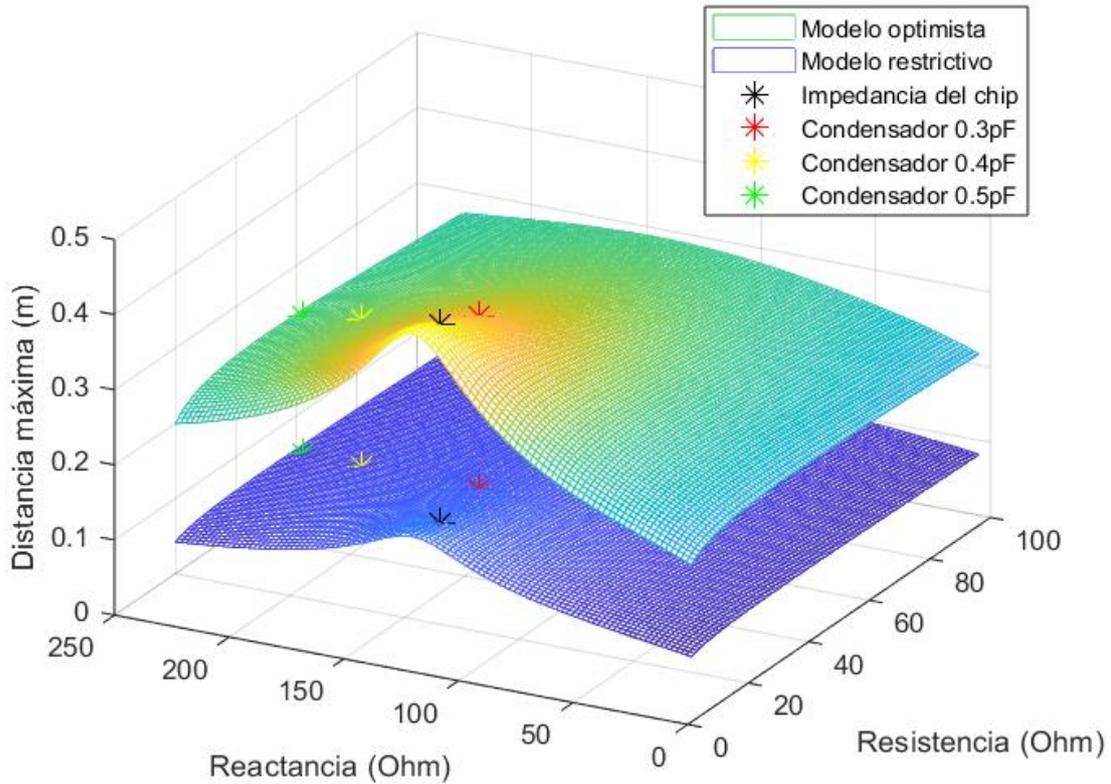


Figura 4-7. Distancia máxima para cada impedancia de antena, según condensador. Tag pequeño

Como podemos ver, ahora el máximo de cobertura está en el condensador de 0,3pF, y su reactancia es prácticamente igual a la del chip conjugada.

A continuación, se muestran los resultados de las pruebas experimentales de distancia máxima de cobertura en espacio libre. Para ello, contamos con una serie de tags, grandes y pequeños, que cuentan con distintos condensadores acoplados. En concreto, contamos con condensadores de 0,36pF, 0,39pF, 0,4pF y 0,43pF para el tag grande, y por otro lado con condensadores de 0,25pF, 0,27pF y 0,3pF para el tag pequeño. Para los condensadores

En la Tabla 3 aparecen todas las medidas realizadas, clasificadas por tamaño de tag y valor de condensador.

<i>Tamaño del tag</i>	<i>Condensador (pF)</i>	<i>Cobertura máxima (cm)</i>
Grande	0,36	27
Grande	0,36	29
Grande	0,39	23
Grande	0,39	27
Grande	0,4	23
Grande	0,43	18
Grande	0,43	26
Pequeño	0,25	1
Pequeño	0,25	1
Pequeño	0,27	2
Pequeño	0,27	1
Pequeño	0,3	17
Pequeño	0,33	13
Pequeño	0,33	15
Pequeño	0,36	5
Pequeño	0,36	10

Tabla 3. Resultados de cobertura máxima según tamaño del tag y valor del condensador

Comprobamos que, para el tag grande, el máximo de cobertura se encuentra en los 0,36pF. Este valor, al estar entre los 0,3pF y 0,4pF, se acerca al óptimo según se vio en las simulaciones.

Por otro lado, el mejor resultado para el tag pequeño ha sido con el condensador de 0,3pF, que se corresponde con el valor más cercano al óptimo que habíamos encontrado en las simulaciones.

Además, comprobamos que los valores de distancia para el caso del tag grande de 0,4pF y el pequeño de 0,3pF, que eran en los que conocíamos la impedancia de la antena, están comprendidos entre la cota máxima y mínima como habíamos estimado con el modelo teórico propuesto.

4.3 Cobertura en un panel aislado

Una vez comprobada la cobertura de los tags en espacio libre, se va a realizar una serie de medidas en un único panel. Se medirá el alcance máximo de cobertura del tag, así como su valor de intensidad de señal o RSSI (Radio Signal Strength Indicator). Este valor, medido en dB, ofrece una estimación de la calidad de la comunicación, y normalmente varía entre -50 y -80dB.

Tendremos el mismo sistema RFID, descrito en la sección 4.1, y tomaremos el mejor caso del tag grande y el mejor del tag pequeño: 0,36pF para el grande y 0,3pF para el pequeño, como vimos en la Tabla 3.

El panel, de dimensiones 24x42cm (Figura 4-8), cuenta con una serie de alambres metálicos que pueden influir en la cobertura del tag.



Figura 4-8. Panel de la colmena

El procedimiento de medida consistirá en colocar el tag en el extremo del panel más cercano al lector. A partir de ahí, cada medida se realizará a 3 cm de separación, hasta llegar al otro extremo del panel. En la Figura 4-9 se observa un ejemplo de situación. Como los alambres que componen el panel son metálicos, puede ser útil diferenciar entre dos posibles casos de medida: colocar el tag entre dos alambres y colocar el tag encima de uno de los alambres.



Figura 4-9. Procedimiento de medida del tag en el panel

Una vez hechas las medidas, se representan los valores de RSSI obtenidos en las medidas en un panel, para el tag grande de 0,36pF y el pequeño de 0,3pF. La distancia máxima de cobertura se dará en el punto más alejado donde se haya detectado el tag.

El caso entre alambres se encuentra en la Figura 4-10 y el caso en el que el tag se encuentra encima de uno de los alambres se observa en la Figura 4-11.

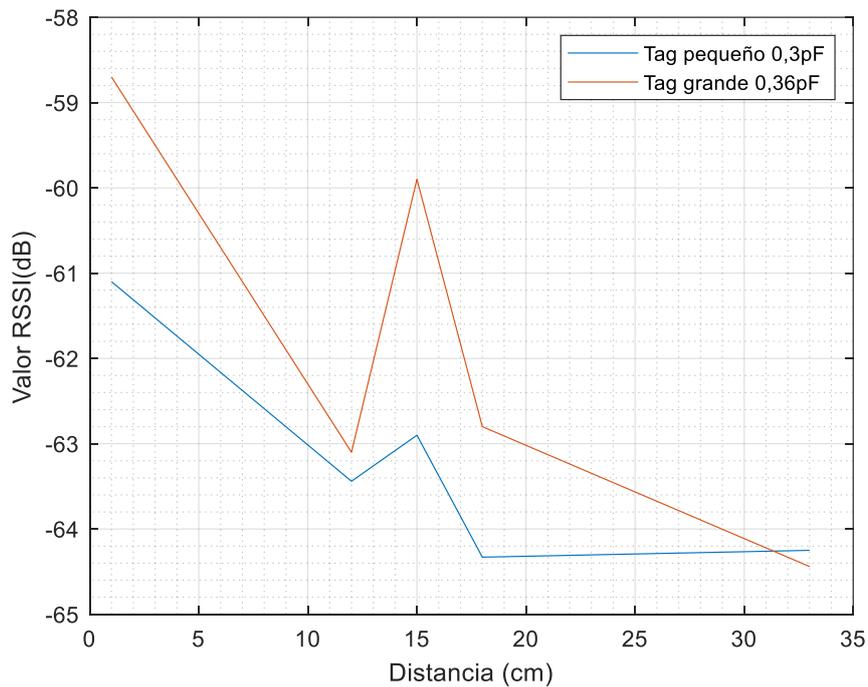


Figura 4-10. Valores RSSI según distancia, un solo panel, tag entre alambres

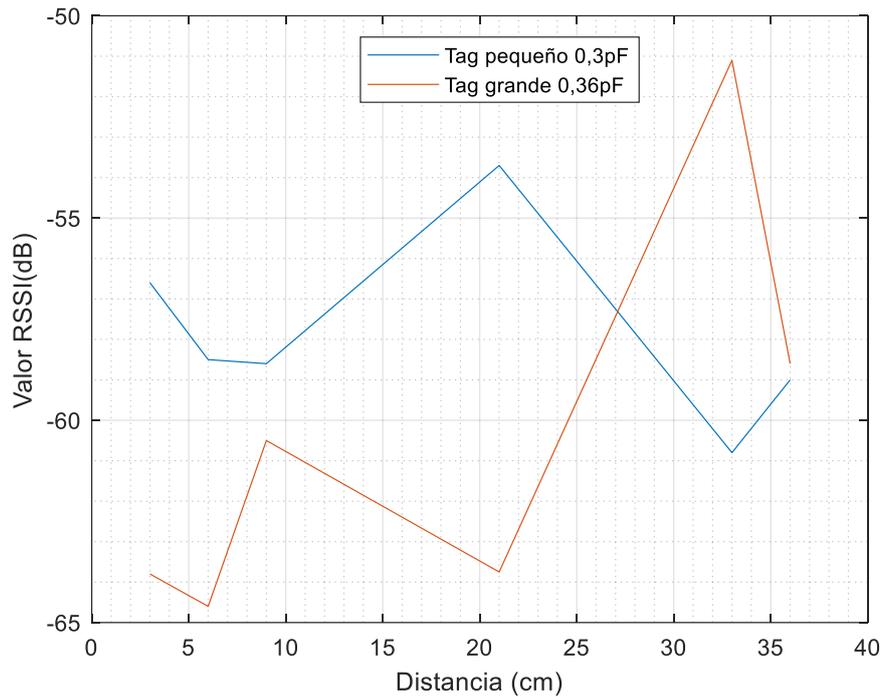


Figura 4-11. Valores RSSI según distancia, un solo panel, tag encima de un alambre

Podemos observar que la cobertura máxima supera los 30cm en ambos casos. Además, comprobamos que cuando el tag está tocando un alambre, su cobertura aumenta ligeramente, así como su valor de RSSI, y por tanto la calidad de la comunicación, lo que nos sugiere que, efectivamente, los alambres del panel contribuyen positivamente a aumentar la cobertura del tag.

4.4 Cobertura en el interior de una colmena

A continuación, se realizarán las mismas medidas en una colmena (Figura 4-12) de dimensiones 48x38cm, que permite colocar hasta un total de 10 panales como el del caso anterior. De este modo comprobaremos el efecto que los otros 9 panales tienen sobre la cobertura del tag.

Estas medidas se realizarán en una cámara anecoica para evitar interferencias. El lector se colocará en uno de los laterales de la colmena, perpendicularmente a la superficie de los panales, tal y como aparece en la Figura 4-13.



Figura 4-12. Colmena utilizada en las pruebas de cobertura

Por otro lado, el tag se localizará en uno de los panales, como se aprecia en la Figura 4-14. Consideraremos el extremo más cercano al lector como una distancia de 6cm, la mínima posible contando con las paredes de la colmena, y como máximo 45cm, que será el otro extremo del panal. Las medidas se realizarán de 3cm en 3cm.

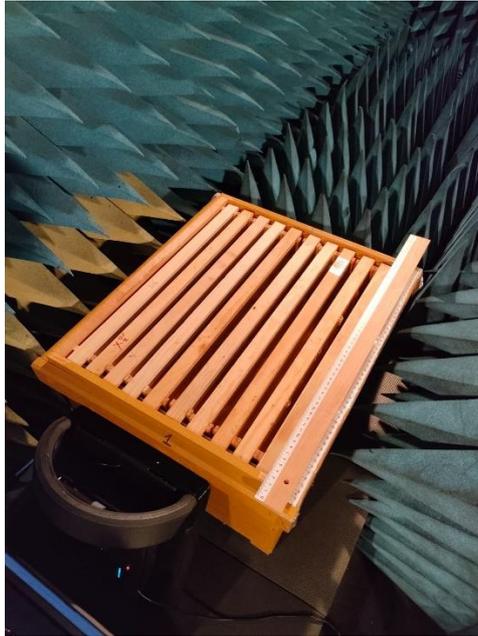


Figura 4-13. Procedimiento de medida en cámara anecoica



Figura 4-14. Colocación del tag en el panel

Al igual que en el caso del panel de la sección 4.3, contaremos con dos posibles casos: colocar el tag entre dos alambres o encima de uno de estos.

En la Figura 4-15 vemos cuando el tag se encuentra entre dos alambres, y en la Figura 4-16 cuando este está encima de un alambre.

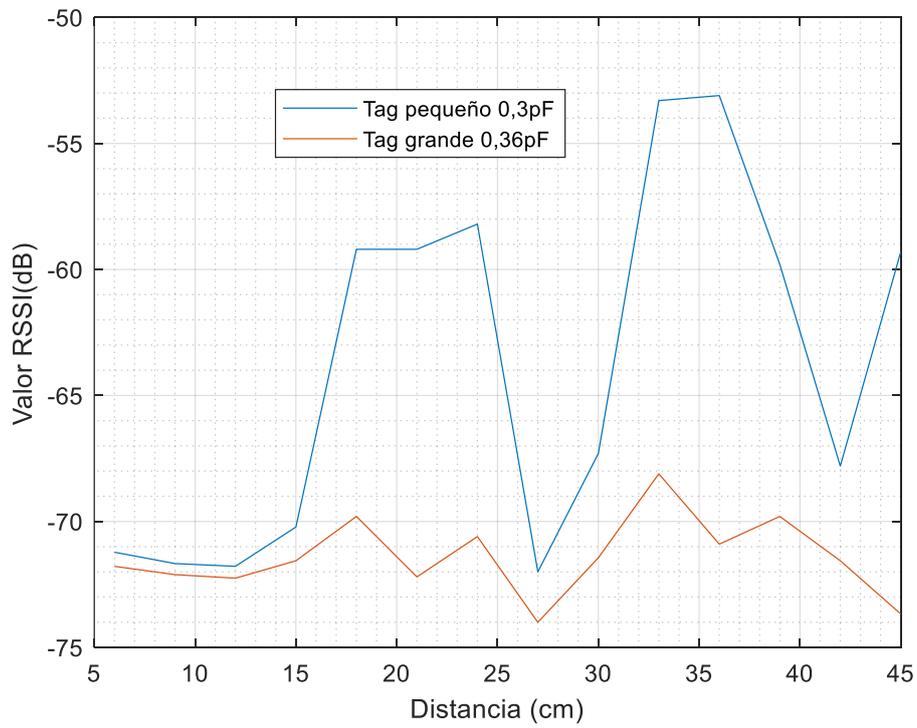


Figura 4-15. Valores RSSI según distancia, colmena entera, tag entre alambres

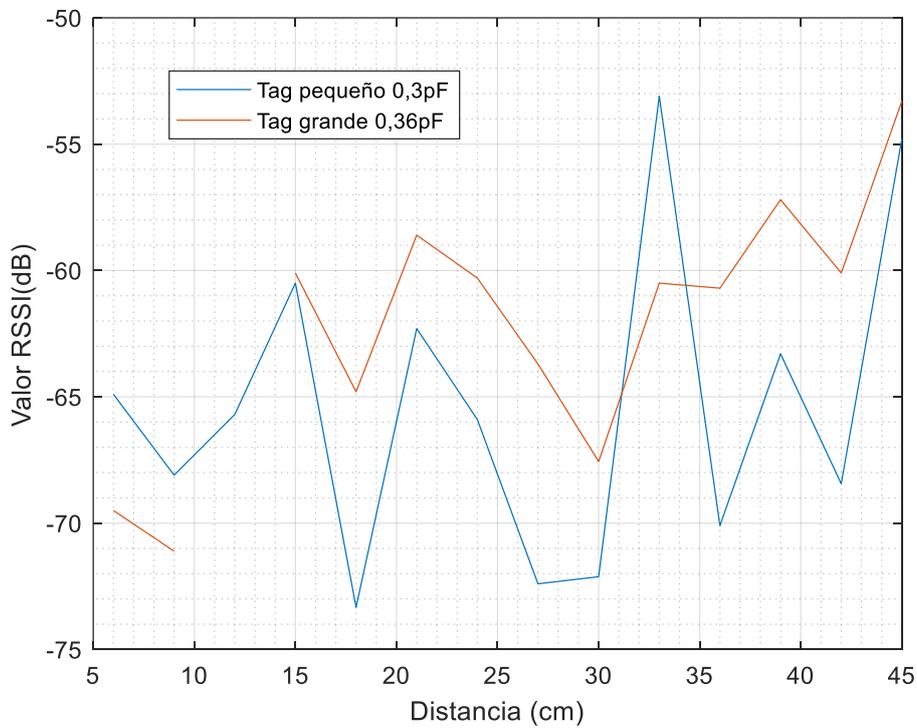


Figura 4-16. Valores RSSI según distancia, colmena entera, tag encima de un alambre

Como podemos observar, la cobertura de ambos tags llega hasta los 45cm en ambas situaciones, superando el caso de un único panal. Además, comprobamos que, al igual que cuando se medía en un único panal, cuando el tag se encuentra encima de un alambre su valor de RSSI aumenta respecto a la situación en la que se coloca entre dos alambres.

Por tanto, comprobamos que efectivamente la cobertura de cualquiera de los tags es total cuando colocamos el lector en un lateral de la colmena, y así se demuestra que podría utilizarse esta tecnología en la identificación y localización de la abeja reina de la colmena.

Además, el efecto de colocar el tag encima de un alambre mejora la comunicación con el lector, respecto a colocarlo entre dos alambres.

5. Conclusiones y líneas futuras

5.1 Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado un estudio teórico y experimental de la cobertura de un sistema RFID en una colmena, con el objetivo de estudiar la posible identificación y localización de la abeja reina.

En primer lugar, se ha aplicado un modelo teórico de balance de enlace en espacio libre para campo cercano. Para ello, se partió de un modelo que consideraba a transmisor y receptor como inductancias, y se particularizó al caso de estudio, con una antena transmisora y una microantena en el receptor. De este modo, las simulaciones permitieron estimar un rango de alcances para el espacio libre.

A continuación, se demostró la validez de este modelo mediante la realización de una campaña de medidas de cobertura máxima en espacio libre.

En segundo lugar, se realizó una segunda campaña de medidas, con el objetivo de comprobar la aplicación del sistema en la identificación y localización de la abeja reina en una colmena. Con este fin, las medidas se realizaron tanto para un único panal como para la colmena en su conjunto.

Los resultados demostraron que la cobertura mejoraba respecto al caso de espacio libre, y además esta cobertura era total para la colmena completa. En concreto, en espacio libre se llegaron a medir 23cm de cobertura con el tag grande y 15cm con el tag pequeño, que aumentaban a 36 y 33cm en un panal aislado y 45cm en ambos tags para la colmena completa.

Por tanto, se ha observado que la cobertura del tag aumenta cuando se coloca en estructuras que contienen alambres paralelos a la dirección de propagación, como son los panales. Además, el efecto aumenta conforme se colocan más elementos de este estilo paralelamente, como en el caso de una colmena.

5.2 Líneas futuras

En las conclusiones de este trabajo se plantea que es posible la localización e identificación de la abeja reina en una colmena, ya que se dispone de cobertura total en su interior.

Sin embargo, en este trabajo no se ha indagado en profundidad el razonamiento teórico por el cual la cobertura en el interior de la colmena es notablemente superior a la que se daba en espacio libre. Por tanto, una posible línea de investigación futura sería el estudio del comportamiento electromagnético de la colmena, con el fin de explicar este fenómeno. Además, esto podría implicar el uso de programas de simulación que son utilizados en este tipo de aplicaciones, como HFSS (High-Frequency Structure Simulator), de Ansys y CST (Computer Simulation Technology), de Simulia.

Como se ha observado en las pruebas de cobertura, el lector permanecía estático durante las medidas, mientras que era el tag el que se movía perpendicularmente a la superficie del lector. Por tanto, una posible línea de investigación sería estudiar el comportamiento del lector cuando éste se mueve a través de los diferentes panales, dejando el tag fijo en uno de ellos.

6. Bibliografía

- [1] E. Pérez de Obanos Cortabarría, «La apicultura: la abeja y el ser humano,» de *La Abeja melífera de Navarra. Estudio de las poblaciones: caracterización molecular y genética*, Pamplona, Gobierno de Navarra, 2008, pp. 425-450.
- [2] L. Pérez-Beltrán, J. Lorenzo-López, J. Fernández-Caballero, M. Cabedo-Fabres, M. Ferrando-Bataller, L. Juan-Llácer, M. Delgado-Restituto y K. Belhaki-Rivas, «Microantena para identificación y localización de la abeja reina desde el exterior de una colmena basado en RFID en la banda de 868 MHz,» de *URSI 2023*, Cáceres, 2023.
- [3] Dipole RFID, «Tipos de Sistemas RFID,» [En línea]. Available: <https://www.dipolerfid.es/blog-rfid/Tipos-Sistemas-RFID>.
- [4] P. de Souza, P. Marendy, K. Barbosa, S. Budi, P. Hirsch, N. Nikolic, T. Gunthorpe, G. Pessin y A. Davie, «Low-Cost Electronic Tagging System for Bee Monitoring,» *Sensors*, vol. 18, nº 7, 2018.
- [5] [En línea]. Available: <https://innodeapi.com/>.
- [6] NextCarm, «NextCarm,» 2022. [En línea]. Available: <https://nextcarm.carm.es/convocatoria/subvenciones-para-contratacion-de-jovenes-demandantes-de-empleo-para-iniciativas-de-investigacion-e-innovacion-programa-investig-2023/>.
- [7] Murata, «Murata Manufacturing,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.murata.com/-/media/webrenewal/products/rfid/rfid/pdf/lxms21acmf-218-datasheet.ashx?la=en-gb&cvid=20221110040000000000>.
- [8] Impinj, «Impinj Support,» 2021. [En línea]. Available: https://support.impinj.com/hc/article_attachments/1500019253582/Impinj_Monza_R6_Tag_Chip_Datasheet_V7_20210521.pdf.
- [9] D. Dobrykh, I. Yusupov, S. Krasikov, A. Mikhailovskaya, D. Shakirova, A. A. Bogdanov, A. Slobozhanyuk, D. Filonov y P. Ginzburg, «Long-Range Miniaturized Ceramic RFID Tags,» *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, vol. 69, nº 6, pp. 3125-3131, 2021.
- [10] J. D. Griffin y G. D. Durgin, «Complete Link Budgets for Backscatter-Radio and RFID Systems,» *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 51, nº 2, pp. 11-25, 2009.

- [11] S. Zuffanelli, P. Aguila, G. Zamora, F. Paredes y F. Martin, «A High-Gain Passive UHF-RFID Tag with Increased Read Range,» *Sensors*, vol. 16, nº 1150, 2016.
- [12] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, Wiley, 1989.
- [13] J. I. Abinya y M. Masihpour, «Near Field Magnetic Induction Communication Link Budget: Agbinya-Masihpour Model,» *978-1-4244-7057-0/10/\$26.00*, 2010.
- [14] S. López-Soriano, «Diseño de antenas para etiquetas de RFID en escenarios de alta exigencia,» 2017.
- [15] J. I. Agbinya y M. Masihpour, «Power Equations and Capacity Performance of Magnetic Induction Communication Systems,» 2011.
- [16] J. I. Abinya y M. Masihpour, «Magnetic Induction Channel Models and Link Budgets: A Comparison between Two Agbinya Masihpour Models,» *978-1-4244-7057-0/10/\$26.00*, pp. 400-405, 2010.

Anexos

Anexo I. Script MATLAB para modelo teórico

```
clc
close all
tag = 0;%Grande->0, Pequeño->1

f=865e6;
omega = 2*pi*f;
ntot = 100;
R_ant = linspace(5,100,ntot);
X_ant = linspace(5,230,ntot);

R_chip = 13.4;
X_chip = -126;

R_r = R_ant+R_chip;
R_t = 50;

P_t=31.5;
P_r=-22;
P=P_t-P_r;
etha = 10*log10(1);
r_t = 0.21/2;
r_r = 0.004/2-0.001/2*tag;
mu = 4*pi*10^-7;

L_t = mu*(r_t*2)^2*1/(r_t*2+0.9*r_t);
L_r = mu*(r_r*2)^2*3^2/(r_r*3*8+0.9*r_r);

C_r = 1/(L_r*omega^2);

C_chip = -1/(X_chip*omega);
L_eq = X_ant/omega+L_r;
C_eq = 1/(1/C_chip+1/C_r);

f0_d_r = 1./sqrt(L_eq.*C_eq);
Q_r = zeros(ntot,ntot);
rho = zeros(ntot,ntot);
Z_chip = R_chip+1i*X_chip;
Z_t = R_ant+1i*X_ant'+Z_chip;
for k=1:ntot
    for l=1:ntot
        Q_r(k,l)=2*pi.*f0_d_r(k).*(L_eq(k))./(R_r(l));
```

```

        rho(k,l) = (Z_chip-(R_ant(l)-
1i*X_ant(k)))./Z_t(k,l);
    end
end
Q_t = omega*L_t./R_t;

R0=0.0216*100;

Q = 10*log10(Q_t.*Q_r);
F=10*log10(omega*mu/(3*3*R0));

tau = 1-abs(rho).^2;
dtau = 10*log10(tau);

%Modelo AM
d1 =
10.^((P+dtau+Q+etha+20*log10(pi)+30*log10(r_t*r_r))/60
);
%Modelo AM1
d2 = 10.^((P+dtau-
F+Q+etha+20*log10(pi)+30*log10(r_t*r_r))/60);

[i_c] = find((R_ant>=R_chip),1);
[j_c] = find((X_ant>=-X_chip),1);

figure,
%En función de X
plot(X_ant,d1(:,i_c));
hold on
plot(X_ant,d2(:,i_c));
xline(-X_chip,'--');
xlabel('Reactancia (Ohm)');
ylabel('Distancia máxima (m)');
legend('Modelo optimista','Modelo
restrictivo','Reactancia chip');

%En función de R
figure,
plot(R_ant,d1(j_c,:));
hold on
plot(R_ant,d2(j_c,:));
xline(R_chip,'--');
xlabel('Resistencia (Ohm)');
ylabel('Distancia máxima (m)');
legend('Modelo optimista','Modelo
restrictivo','Resistencia chip');

%3D

```

```

figure,
mesh(R_ant,X_ant,d1);
hold on
mesh(R_ant,X_ant,d2);

plot3(R_chip,-X_chip, d1(j_c,i_c), '*', 'Color', 'k',
'MarkerSize', 10);
h=plot3(R_chip,-X_chip, d2(j_c,i_c), '*', 'Color',
'k', 'MarkerSize', 10);
h.Annotation.LegendInformation.IconDisplayStyle =
'off';

cap = [0.3 0.4 0.5 0.3 0.4 0.5];
rea = [30.08 39.38 42.86 33.8 40.37 43.3];
ima = [106.37 188.85 215.81 135.5 193.78 223.76];
colors = ["red" "yellow" "green"];
colors = [colors colors];
for k=1:3
    k_t = (k+3*tag);
    [i_ak] = find((R_ant>=rea(k_t)),1);
    [j_ak] = find((X_ant>=ima(k_t)),1);
    plot3(R_ant(i_ak),X_ant(j_ak), d1(j_ak,i_ak), '*',
'Color', colors(k), 'MarkerSize', 10);
    h=plot3(R_ant(i_ak),X_ant(j_ak), d2(j_ak,i_ak),
'*', 'Color', colors(k), 'MarkerSize', 10);
    h.Annotation.LegendInformation.IconDisplayStyle =
'off';
end

xlabel('Resistencia (Ohm)');
ylabel('Reactancia (Ohm)');
zlabel('Distancia máxima (m)');
legend('Modelo optimista','Modelo
restrictivo','Impedancia del chip','Condensador
0.3pF','Condensador 0.4pF','Condensador 0.5pF');

```

Anexo II. Script MATLAB para representación de medidas

```
clc
close all

casos =
["EL", "CV", "1PEA", "1PA", "CEA", "CA", "NEL", "1PSEA", "1PSA
"];
n_med = 14;
l = size(casos);
l = l(2);
z_t=zeros(n_med,2,l);
med_t=zeros(n_med,2,l);
max_t=zeros(n_med,2,l);

for i=1:l
    file_p = strcat(casos(i), '_pequeño.txt');
    file_g = strcat(casos(i), '_grande.txt');
    MAT_p = readtable(file_p);
    z_full_p = MAT_p.z;
    if(z_full_p(1)<=0)
        z_full_p(1)=1;
    end

    med_full_p = MAT_p.med;
    max_full_p = MAT_p.max;
    z_t(:,1,i) = z_full_p;
    med_t(:,1,i) = med_full_p;
    max_t(:,1,i) = max_full_p;

    MAT_g = readtable(file_g);
    z_full_g = MAT_g.z;
    if(z_full_g(1)<=0)
        z_full_g(1)=1;
    end
    med_full_g = MAT_g.med;
    max_full_g = MAT_g.max;

    z_t(:,2,i) = z_full_g;
    med_t(:,2,i) = med_full_g;
    max_t(:,2,i) = max_full_g;
end

%Distancias logaritmicas
zlog_t = 10*log10(z_t);
CASO = 9; %["EL", "CV", "1PEA", "1PA", "CEA", "CA", "NEL"]
TAG = 1; %1 pequeño, 2 grande
```

```

x = z_t(:,1,CASO);
y = med_t(:,1,CASO);
x2 = z_t(:,2,CASO);
y2 = med_t(:,2,CASO);
ind = find(y<0);
x = x(ind);
y = y(ind);
ind2 = find(y2<0);
x2 = x2(ind);
y2 = y2(ind);
p = polyfit(x,y,1);
recta = polyval(p,x);
figure,
plot(x,y);
grid on
grid minor
hold on
plot(x2,y2);
xlabel('Distancia (cm)');
ylabel('Valor RSSI(dB)');
legend('Tag pequeño 0,3pF','Tag grande 0,36pF');

```

Anexo III. Código C++ para medidas con el lector

```
//#include "HardwareSerial.h"
#include <Arduino.h>
#include <driver/ledc.h>
#include <Adafruit_SH110X.h>
#define tiempo 50

#define pulsador GPIO_NUM_15
#define ledactiv GPIO_NUM_27
#define nticks 10//((TIEMPO TOTAL DE MEDIDA)/(CONSTANTE TIEMPO)
#define max_notags 5//VECES QUE PUEDE NO LEER HASTA QUE SALTE A SIGUIENTE
MUESTRA

#define max_ori 1//NUMERO TOTAL DE ORIENTACIONES
#define max_medida 14

Adafruit_SH1106G display(128, 64, &Wire, -1); //Pantalla LCD SH1106 de
128x64
//Secuencia InventoryTag con RSSI
const byte sqinventorytag[] = {0x80, 0x01, //Fixed
                                0x00, 0x00, //Message ID
                                0x00, 0x00, 0x53, 0x58, //Vendor ID =
CAEN SPA
                                0x00, 0x29, //Message Length

                                0x00, 0x00, //Reserved
                                0x00, 0x08, //AVP Length
                                0x00, 0x01, //AVP Type = CommandName
                                0x00, 0x13, //AVP Value = InventoryTag
                                /*--Con RSSI
                                0x00, 0x00, //Reserved
                                0x00, 0x08, //AVP Length
                                0x00, 0x67, //AVP Type = Bitmask
                                0x00, 0x01, //AVP Value = 1
                                */
                                0x00, 0x00, //Reserved
                                0x00, 0x0F, //AVP Length
                                0x00, 0xFB, //SourceName
                                0x53, 0x6F, 0x75, 0x72, 0x63, 0x65,
0x5F, 0x30, 0x00};

//Secuencia SetPower para potencia 0x0578 = 1400mW
const byte sqsetpower[] = {0x80, 0x01, //Fixed
                            0x00, 0x00, //Message ID
                            0x00, 0x00, 0x53, 0x58, //Vendor ID = CAEN
SpA
                            0x00, 0x1C, //Message Length
```

```

        0x00, 0x00, //Reserved
        0x00, 0x08, //AVP Length
        0x00, 0x01, //AVP Type = Commandname
        0x00, 0x64, //AVP Value = Set Power

        0x00, 0x00, //Reserved
        0x00, 0x0A, //AVP Length
        0x00, 0x96, //AVP Type = Power Set
        0x00, 0x00, 0x05, 0x78}; //1400 (mW)

bool pulsado = false; //Indica si el botón está siendo presionado, vuelve
a false sólo cuando se suelta
bool todo_ok = true; //Indica si podemos cambiar a la siguiente medida,
sólo si tenemos n ticks

int notags=0;//Número de veces que no se detectó tag
bool hardpass=false;//Pasa a la siguiente muestra forzosamente

int medida=-1;//Una medida por cada distancia
int tick=0;//Necesita al menos n para hacer una buena medida
//int orientacion = 0; //0- Base lado corto
//1- Base lado largo
//2- Bobina a antena
//3- Bobina 90º antena
//4- Bobina 180º antena
//5- Bobina arriba lado corto
//6- Bobina arriba lado largo
//7- Chip de pie bobina frente a antena
//8- Chip de pie bobina 90º a antena
//9- Chip de pie bobina 180º a antena

int orientacion = 0; //0- Bobina plano YZ. Antena ve lado corto
//1- Bobina plano YZ. Giro 90º
//2- Bobina plano YZ. Giro 180º
//3- Bobina plano YZ. Giro 270º

float medias_tabla[max_medida*max_ori];
float maximo_tabla[max_medida*max_ori];
float medias_or[max_medida];
float maximo_or[max_medida];
float muestra_ticks[nticks];

String nombre_tag;

int x,y,z;

float media=0;

```

```

float maximo=0;

float RSSI=0;

void setup() {

    //Inicialización variables
    x=20;
    y=24;
    z=0;

    //Configuramos los pines de entrada y salida
    pinMode(pulsador, INPUT_PULLUP);
    pinMode(ledactiv, OUTPUT);
    digitalWrite(ledactiv, LOW);
    //Configuramos el puerto serie USB (Serial) y el lector (Serial2)
    Serial.begin(115200);
    Serial2.begin(115200);

    ledc_timer_config_t ledc_timer = {
        .speed_mode      = LEDC_HIGH_SPEED_MODE,
        .duty_resolution = LEDC_TIMER_12_BIT,
        .timer_num       = LEDC_TIMER_0,
        .freq_hz         = 3,
        .clk_cfg         = LEDC_AUTO_CLK
    };
    ESP_ERROR_CHECK(ledc_timer_config(&ledc_timer));
    ledc_channel_config_t ledc_channel = {
        .gpio_num        = GPIO_NUM_14,
        .speed_mode      = LEDC_HIGH_SPEED_MODE,
        .channel         = LEDC_CHANNEL_0,
        .intr_type       = LEDC_INTR_DISABLE,
        .timer_sel       = LEDC_TIMER_0,
        .duty            = 0,
        .hpoint          = 0
    };
    ESP_ERROR_CHECK(ledc_channel_config(&ledc_channel));

    display.begin(0x3c, true);

    delay(2000); //Necesario para display
    Serial.println("-----INICIO-----");
    nombre_tag = "";
    //Enviamos secuencia setpower
    enviarsetpower();

    //Configuramos Display
    display.clearDisplay();
    display.setTextSize(2);

```

```

display.setTextColor(SH110X_WHITE);
display.setCursor(1, 1);
display.println("DESACTIV");
display.display();
display.setTextSize(1);
//Primera fila excel
delay(1000);
Serial.println("z;med;max");
}

void loop() {
  bool datoscorrectos = false;
  if (digitalRead(pulsador) == LOW && (pulsado == false) && todo_ok) {
    todo_ok=false;
    pulsado = true;
    nombre_tag = "";
    medida++;
    z=medida*3;
    if(medida>=max_medida){
      //Cada 6 medidas, aumenta la orientación
      medida=0;
      z=0;
      orientacion++;
    }
    if(orientacion>=max_ori){
      digitalWrite(ledactiv, LOW);
      Serial.println("");
      Serial.println("-----");
      todo_ok = true;
      medida=-1;
      z=0;
      tick=0;
      orientacion=0;
      display.clearDisplay();
      display.setTextSize(2);
      display.setTextColor(SH110X_WHITE);
      display.setCursor(1, 1);
      display.println("DESACTIV");
      display.display();
      display.setTextSize(1);
      //Primera fila excel
      Serial.println("z;med;max");
    }

    delay(500);
  }
  if(digitalRead(pulsador) == HIGH){
    pulsado = false;

```

```

}
//Hemos llegado al máximo de muestras, tomamos las medidas
if(tick==nticks){
    tick = 0;
    todo_ok=true;
    media = 0.0f;
    maximo = 999.0f;
    int i=0;
    int m=0;
    for(i=0;i<nticks;i++){
        float dato=muestra_ticks[i];
        if (dato>0.0f){
            media=media+dato;
            m++;
            maximo = -max(-maximo,-dato);//Son negativos, por eso el maximo
sera el negativo menos pequeño
        } else{
            continue;
        }
    }
    if(m>0){
        media = media/m;
    }else{
        media = -1;
    }
    if(maximo>900.0f)maximo=-1;
    //Ponemos valores en los arrays
    medias_or[medida]=media;
    maximo_or[medida]=maximo;
    medias_tabla[medida+orientacion*max_medida]=media;
    maximo_tabla[medida+orientacion*max_medida]=maximo;
    //Indicamos que ya hemos acabado
    cambiarfreq(0);
    display.clearDisplay();
    display.setCursor(1, 1);
    display.setTextSize(2);
    display.println("MEDIDO");
    //Imprimimos fila excel
    Serial.print(z);

    Serial.print(";");
    String media_s=String(media);
    if(media>0){
        Serial.print("-");
        Serial.print(media_s);
    }else{
        Serial.print(" ");
    }
    Serial.print(";");

```

```

String maximo_s=String(maximo);
if(maximo>0){
    Serial.print("-");
    Serial.println(maximo_s);
}else{
    Serial.println(" ");
}
display.setCursor(0,48);
display.setTextSize(1);
if(media>0){
    display.print("RSSI med: -");
    display.println(media_s);
}else{
    display.println("No hay RSSI med");
}
if(maximo>0){
    display.print("RSSI max: -");
    display.println(maximo_s);
}else{
    display.println("No hay RSSI max");
}
//display.println("");
display.display();
}else if (!todo_ok){
    //Si no ha acabado la medida, indica que está leyendo
    display.clearDisplay();
    display.setCursor(1, 1);
    display.setTextSize(2);
    display.print("LEC ");
    display.print(tick+1);
    display.print("/");
    display.println(nticks);
    display.println(nombre_tag);
}
if(medida>-1){
    //Si no está inactivo, muestra siempre la medida pertinente
    display.setCursor(1,20);
    display.setTextSize(1);
    display.print("Medida: ");
    if(z>0){
        display.print(z);
    }else{
        display.print(1);
    }
}

display.print("cm, ");
display.print(medida+1);
display.print("/");
display.println(max_medida);

```

```

    display.display();
}

if(!todo_ok&&orientacion<max_ori){
    //Si todavía no ha acabado la medida, toma muestra
    if(!Serial2.available()){
        enviarinventorytag();
        digitalWrite(ledactiv, LOW);
    }else{
        datoscorrectos = recibirdatos();
        if(notags==max_notags){
            notags=0;
            hardpass=true;
            RSSI=-1;
        }
        if(datoscorrectos||hardpass){
            hardpass=false;
            digitalWrite(ledactiv, datoscorrectos);
            delay(10);
            if(datoscorrectos){
                muestra_ticks[tick]=RSSI;
            }else{
                muestra_ticks[tick]=-1;
            }
            tick++;
        }
    }
}
delay(tiempo);
}

//Enviamos secuencia de configuración de potencia
void enviarsetpower() {

    int len = sizeof(sqsetpower);
    Serial2.write(sqsetpower,len);
    //Recibimos respuesta
    int byte_r = Serial2.available();
    if (byte_r>0) {
        int i=0;
        for(i=0;i<byte_r;i++){
            byte dato_r = Serial2.read();
        }
    }
}
//Enviamos secuencia inventorytag

```

```

void enviarinventorytag() {
    int len = sizeof(sqinventorytag);
    Serial2.write(sqinventorytag, len);
}

//Recibimos los datos
bool recibirdatos() {
    byte datosenbruto[256]; //Buffer de datos
    byte p_datos[10]; //Primeros 10 bytes

    byte longitud = 255; //Longitud de los datos recibidos en bytes
    int longitudtagid = 0; //Longitud en bytes del tag RFID
    int irssi = 0; //Valor RSSI, factor 10
    float frssi = 0; //Valor RSSI, real;

    int iniciocomandotag; //Byte por el que empieza el String del tag
    int cont;

    //RECIBIR CABECERA
    if (!Serial2.available()) return false; //No tiene al menos 10 bytes de
datos
    //Serial.println("RESPUESTA");
    int i=0;
    for(i=0; i<255; i++){
        //Si llegamos a la longitud máxima, o si no quedan bytes por leer,
salimos del bucle
        if(i>=longitud || !Serial2.available()) break;
        //Si no, leemos byte a byte
        byte dato = Serial2.read();
        if(i<10){
            p_datos[i]=dato;
        }
        if(i==10){
            longitud = p_datos[9];
        }
        datosenbruto[i]=dato;
    }

    //BUSCAR TAG ID
    bool corr = false;
    for (cont=10; cont<longitud-5; cont++) {

        //Escogemos bit a bit si se recibe el TAG
        byte b0 = datosenbruto[cont];
        byte b1 = datosenbruto[cont+1];
        byte b2 = datosenbruto[cont+2];
        byte b3 = datosenbruto[cont+3];
        byte b4 = datosenbruto[cont+4];
    }
}

```

```

byte b5 = datosenbruto[cont+5];
byte b7 = datosenbruto[cont+7];
//No ha detectado TAG
if(longitud==26 && b7==0x13){
    corr = true;//No detectó nada
    notags++;
}
//Recepción correcta
else if (b0 == 0 && b1 == 0 && b4 == 0 && b5 == 0x11) { //Comando
recibir TAG ID
    iniciocomandotag = cont + 6;
    longitudtagid = b3 - 6;
    corr = true;
}
else if (b0 == 0 && b1 == 0 && b2 == 0 && b3 == 8 && b4 == 0 && b5 ==
0x7A) { //Potencia RSSI
    irssi = 65535 - (datosenbruto[cont+6] * 256 +
datosenbruto[cont+7]); //Valor entero
    frssi = irssi / 10; //Valor decimal
    corr = true;
}
}
if(corr==false){
    notags++;
    cambiarfreq(0);
    return false;
}

//Encontrado
display.clearDisplay();
display.setCursor(0, 0);
display.setTextSize(1);
if (longitudtagid != 0) {

    for (cont=iniciocomandotag; cont<iniciocomandotag+longitudtagid;
cont++) {
        nombre_tag = "";
        if (cont==iniciocomandotag+longitudtagid-3) {
            byte dato = datosenbruto[cont];
            if(dato<16){
                nombre_tag = nombre_tag+"0";
            }
            nombre_tag = nombre_tag+String(datosenbruto[cont]);
        }
    }
    if(corr)RSSI=frssi;
    cambiarfreq(irssi);
}

```

```

        return true;
    }else{
        cambiarfreq(0);
        RSSI=-1;
        return false;
    }
}

void cambiarfreq(int valorrssi) { //Recibido valor RSSI multiplicado por
10, valor normal entre 350-850 (equ -35.0 a -85.0)
    uint32_t vrrssiconvertido;//Valor RSSI acotado
    uint32_t nuevoduty;//Nuevo duty cicle del led, 0 en off
    uint32_t nuevafreq;//Frecuencia calculada según RSSI
    if (valorrssi > 0) {
        vrrssiconvertido = valorrssi;
        if (valorrssi < 350) {vrrssiconvertido = 350;}
        else if (valorrssi > 850) {vrrssiconvertido = 850;}
        nuevoduty = 4500 - (vrrssiconvertido - 350) * 9;
        nuevafreq = 1+round(nuevoduty / 400); //1Hz para -85.0
        ledc_set_freq(LED_C_HIGH_SPEED_MODE, LEDC_TIMER_0, nuevafreq);
    }
    else { nuevoduty = 0; }
    ledc_set_duty(LED_C_HIGH_SPEED_MODE, LEDC_CHANNEL_0, nuevoduty);
    ledc_update_duty(LED_C_HIGH_SPEED_MODE, LEDC_CHANNEL_0);
}

```