

Universidad de Oriente
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Telecomunicaciones



TRABAJO DE DIPLOMA

Diseño de una antena tag RFID pasiva de orden cero (ZOR) en UHF con metamateriales.

Autor: Javier Alberto Ramírez Torres.

Tutor: Ing. Enaide Maine Calzado.

Santiago de Cuba

Junio, 2015

Universidad de Oriente
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Telecomunicaciones



TRABAJO DE DIPLOMA

Diseño de una antena tag RFID pasiva de orden cero (ZOR) en UHF con metamateriales.

Autor: Javier Alberto Ramírez Torres.

javier.ramirez@tle.fie.uo.edu.cu

Tutor: Ing. Enaide Maine Calzado.

Profesor Instructor, Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica, Facultad de Ingeniería Eléctrica, ezerum@fie.uo.edu.cu

Santiago de Cuba

Junio, 2015



COMPROMISO DEL AUTOR

Hago constar que el presente trabajo de diploma es de mi autoría exclusivamente, no constituyendo copia de ningún trabajo realizado anteriormente y las fuentes usadas para la realización del trabajo se encuentran referidas en la bibliografía. Doy mi consentimiento a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización del Tutor o Institución.

Firma del Autor

PENSAMIENTO

No puedo cambiar la dirección del viento, pero sí ajustar las velas para llegar siempre a mi destino.
James Deam

DEDICATORIA

A mis abuelos Aleida y Eddy, por ser los guías de mis pasos y arquitectos de esta gran familia.

A mi madre por todo su amor y comprensión, por su apoyo constante y por haberme inculcado siempre el espíritu de lucha ante las adversidades.

A mi tío Dito por ser mi motor impulsor, por ser mi ejemplo a seguir, por su preocupación, por su comprensión y su entrega durante toda la vida.

A Tito (Ernesto José Reina Heredia) por ser la mejor persona que he conocido, y aunque no estés presente siempre te recordaré...

AGRADECIMIENTOS

A mis abuelos Aleida y Eddy por todo el amor, la confianza y el ejemplo que me han dado en la vida, por haberme guiado por el mejor de los senderos, por convertirme en un hombre de bien y entregarlo todo por mí, sin ustedes este sueño no hubiese sido posible, les debo todo lo que soy.

A mi madre y a mi tío Dito que desde siempre han estado a mi lado, dándome su apoyo incondicional.

A mi prima Diana Ramírez porque siempre ha estado ahí cuando la he necesitado.

Al resto de mis familiares que de una forma u otra contribuyeron con mi formación.

A mis amigos Albin, Adrián Estrada y Máximo por el apoyo y la fuerza que me dieron en los momentos difíciles y por los buenos momentos compartidos.

A mi tutor Ing. Enaide Maine Calzado por toda su ayuda y su paciencia.

A mis amigos del barrio Juan Miguel (Pelao) y Aleicito por su apoyo, y por los buenos ratos que hacían que me olvidara de los problemas de la universidad.

A mis amigos de la vocacional Alberto Ramírez Deras, Mario Antonio Cañete (Tony) y a Santiago (Chago) por los gratos momentos vividos y por haberme inculcado siempre que no me rinda y luche hasta el final.

A mis amigos Landy, Adrián Velázquez, Remón, Espronceda, Elchi y al resto de los compañeros del aula por todos estos años que hemos afrontado juntos.

A todos los que de una manera u otra han colaborado en mi formación como profesional.

A todos los que de una manera u otra se han preocupado por mi situación en la universidad y me han preguntado cómo va la tesis.

A Jesús, Nuestro Señor, y a la Virgen de la Caridad del Cobre.

RESUMEN

Los sistemas de tecnología RFID (Identificación por Radiofrecuencia) tienen mayor penetración en aplicaciones de identificación, control y rastreo de objetos. Estos sistemas se componen de un lector, el medio de transmisión o sea el espacio libre, y una etiqueta que se fija en el objeto a identificar. Existen sistemas de identificación de campo cercano y campo lejano, que a su vez se pueden dividir en sistemas con etiquetas pasivas y activas.

En el presente trabajo se realiza el diseño y simulación de una etiqueta pasiva para los sistemas de RFID en la banda de los UHF. En el primer capítulo se realiza un análisis de los principales fundamentos teóricos de la tecnología RFID, tales como: características de los *tags*, bandas de frecuencias y aplicaciones de la tecnología. Las características de propagación zurda que presentan las antenas compuestas por capacitores interdigitales, las cuales presentan rasgos de estructuras metamateriales, así como las estructuras de guías de ondas coplanares y la resonancia de orden cero son presentadas en el segundo capítulo. En el tercer capítulo se realiza el diseño y simulación de la antena tag RFID pasiva de resonancia de orden cero con guía de ondas coplanares cargadas con capacitores interdigitales utilizando el software de simulación HFSS v15, exhibiendo las características de radiación de la antena diseñada.

Palabras clave: RFID, metamateriales, guías de ondas coplanares (CPW), UHF y capacitores interdigitales.

ABSTRACT

RFID systems (Radio Frequency Identification) have greater insight into application identification, control and object tracking. These systems comprise a reader, the transmission medium or free space, and a label that is attached to the object to be identified. Identification systems are: near-field and far-field, which in turn can be divided into systems with passive and active tags.

In this paper, the design and simulation of a passive tag for RFID systems in the UHF band is made. In the first chapter, an analysis of the main theoretical foundations of RFID

technology, such as tags characteristics, frequency bands and applications of this technology is made. Left handed propagation characteristics of antennas composed of interdigital capacitors, which have features of metamaterials structures, as well as coplanar waveguide structures and the zero-order resonance are presented in the second chapter. In the third chapter, a design and simulation of a zeroth order resonator UHF RFID passive tag antenna with capacitive loaded coplanar waveguide charged with interdigital capacitors is made, using simulation software HFSS 15, and showing the radiation characteristics of the antenna design.

Keywords: *RFID, metamaterials, coplanar waveguide (CPW), UHF and interdigital capacitor.*

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| CAPITULO 1 . Fundamentos teóricos de RFID..... | 4 |
| 1.1 Características del <i>tag</i> | 4 |
| 1.2 Características del lector..... | 6 |
| 1.3 Clasificación de los sistemas RFID..... | 7 |
| 1.4 Bandas de frecuencias de RFID..... | 9 |
| 1.5 Funcionamiento general de RFID..... | 11 |
| 1.6 Antenas en el sistema RFID pasivo..... | 15 |
| 1.6.1 Parámetros importantes en las antenas de etiquetas de RFID pasivas..... | 15 |
| 1.7 Identificador de tarjetas RFID..... | 19 |
| 1.8 Comparación entre RFID y el código de barras..... | 20 |
| 1.9 Limitaciones de RFID..... | 21 |
| 1.10 Aplicaciones de RFID..... | 23 |
| 1.10.1 Seguridad..... | 24 |
| 1.10.2 Trazabilidad de alimentos..... | 25 |
| 1.10.3 Monitoreo y control de inventario..... | 26 |
| 1.10.4 Identificación y seguimiento de equipajes..... | 26 |
| CAPITULO 2 . MATERIALES Y MÉTODOS..... | 27 |
| 2.1 Tecnología RFID en la banda de UHF..... | 27 |
| 2.1.1 Tipos de antenas incorporadas en las etiquetas RFID en UHF..... | 27 |
| 2.2 Línea de transmisión metamaterial basada en SRR..... | 28 |
| 2.3 Estructuras coplanares de guía de onda..... | 34 |
| 2.4 Capacitor interdigital cargado..... | 36 |
| 2.5 Diseño de una etiqueta de RFID pasiva..... | 40 |
| 2.5.1 Requisitos de la antena..... | 40 |
| CAPITULO 3 . DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ANTENA <i>TAG</i> RFID PASIVA EN UHF..... | 45 |
| 3.1 Diseño de la antena..... | 45 |
| 3.2 Estructura de la antena diseñada..... | 47 |
| 3.3 Resultado de la simulación..... | 48 |

| | |
|--------------------------------------|----|
| 3.4 Conclusiones del capítulo | 51 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 52 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 53 |
| GLOSARIO DE TÉRMINOS | 55 |

INTRODUCCIÓN

La identificación por radiofrecuencia se ha convertido en uno de los sistemas más populares y con un amplio despliegue comercial en numerosos campos y aplicaciones. Entre las que se encuentran las cadenas de suministro, los implantes médicos, el seguimiento de los objetos de una biblioteca, los sistemas de peaje en carreteras, el control de acceso a edificios, la seguridad en la aviación o aplicaciones de seguridad nacional. El objetivo de estos sistemas es seguir, controlar, informar y administrar los elementos que se mueven a través de diferentes ubicaciones físicas. Entre las aplicaciones prácticas más concretas se encuentran el control remoto para abrir y cerrar las puertas de un coche y tarjetas para pagar el transporte público [1].

Identificación por Radiofrecuencia consiste en la identificación de un elemento dentro de un radio de acción determinado. Un sistema RFID está formado por dos componentes fundamentales: un lector (*reader*) y una etiqueta (*tag*). El lector se encarga de enviar una señal que, en caso de que la etiqueta se encuentre a una distancia del lector tal que la potencia recibida supere el umbral mínimo para alimentar al chip que se encuentra en la etiqueta, responderá con su propio identificador (ID). Dicho ID lo recogerá el lector que se encargará de consultar su base de datos para reconocer el objeto. Por lo tanto, la tarjeta y el lector estarán formados por dos componentes fundamentales: la antena encargada de realizar la transmisión por RF (*Radio Frequency* o radiofrecuencia) y el chip, cuya misión es la de modular/demodular la señal así como almacenar los datos necesarios.

La identificación de objetos se viene realizando mediante los códigos de barras los cuales se caracterizan por su baja capacidad de almacenamiento de datos y por no poder ser reprogramados. Los códigos de barras han desarrollado su funcionamiento añadiendo chips de silicio que puedan transferir sus datos al lector sin que haya contacto físico, como los lectores infrarrojos. Con este sistema se consigue reemplazar los sistemas de identificación por código de barras, aumentando la velocidad gracias a que la comunicación entre la tarjeta y el lector no está tan limitada, no es necesario alinear el código con el lector y además cada tarjeta posee un ID único.

La tecnología RFID tiene varias ventajas muy importantes como: la rapidez, la capacidad de almacenamiento, el tamaño, la seguridad, etc. Esta tecnología está basada en ondas de radio para transmitir y recibir información sin el uso de cables. Se ha utilizado en muchos dispositivos, pero fue hasta hace poco que despertó el interés de utilizarlo como identificación de "objetos", principalmente en empresas de tipo logístico, consumo, salud y algunas aplicaciones gubernamentales.

Pese a todas estas aplicaciones, hay que tener muy en cuenta los aspectos y riesgos de seguridad que presentan los sistemas RFID en aras de maximizar los beneficios. Esto ocurre debido a que las tarjetas emiten la información que contienen mediante radiodifusión (*broadcast*), permitiendo a cualquiera poder interceptar la señal e intentar dar con la información encriptada. Además, en determinadas aplicaciones, los chips contienen información sobre el precio y el producto que representan en zonas de memoria con capacidad de escritura. Esta información se puede modificar siempre y cuando no haya un exhaustivo control [1].

Antecedentes del problema

El uso y el desarrollo de sistemas de identificación de radiofrecuencia (RFID) han experimentado un crecimiento sustancial en la última década en muchas áreas nuevas. Algunas de estas áreas incluyen sistemas de sensores inalámbricos, metamateriales y antenas compactas. Sin embargo, gran parte de este nuevo crecimiento ha requerido un mayor rendimiento de los sistemas RFID pasivos tradicionales. En particular, la necesidad de antenas más compactas con actuaciones comparables a las antenas resonantes mucho más grandes, es una de tales condiciones. Para cumplir los requisitos de antenas compactas, los investigadores han desarrollado varios diseños nuevos de antenas RFID, incluyendo diseños de antenas RFID basadas en metamateriales, para mejorar el rendimiento de los sistemas RFID. Uno de los métodos para reducir el tamaño total de la antena es el uso de líneas de transmisión (TL) basadas en metamateriales, permitiendo mostrar la propiedad única de resonancia de orden cero (ZOR, *Zeroth Order Resonance*). Sin embargo la identificación de productos u objetos utilizando la banda de frecuencia UHF entre los 860 y los 960 MHz no deja de ser el "bonsái" de las comunicaciones de radio, porque se utilizan antenas de un grosor de micras y porque las potencias de emisión de los *tags* RFID no superan los 200 μ W.

Problema a resolver

Necesidad de obtener las características físicas y de radiación de una antena *tag* RFID pasiva de orden cero (ZOR) con metamateriales que permitan la implementación de aplicaciones en la banda de UHF a la frecuencia de 915 MHz.

Objeto de estudio

Sistemas de radiocomunicaciones.

Objetivos

Realizar el diseño, simulación y optimización de la antena *tag* RFID pasiva con metamateriales en UHF, a la frecuencia de 915 MHz, utilizando la herramienta computacional HFSS v15.

Tareas

- I. Realizar el estudio del funcionamiento de la tecnología RFID.
- II. Realizar un profundo estudio sobre los metamateriales.
- III. Caracterizar los parámetros fundamentales que gobiernan el funcionamiento de las antenas *tags* RFID pasivas en la banda de UHF.
- IV. Diseñar la antena *tag* RFID pasiva de orden cero (ZOR) en la banda de UHF con metamateriales a la frecuencia de 915MHz.
- V. Simular la antena *tag* RFID pasiva de orden cero (ZOR) en la banda de UHF con metamateriales a la frecuencia de 915MHz diseñada mediante la herramienta computacional HFSS v15 para obtener sus características de radiación.
- VI. Confección del informe y de la presentación del trabajo de diploma.

Hipótesis

Si se determina de manera eficiente, mediante una herramienta computacional, las características de radiación de la antena y estas son directivas, se podrá obtener una antena *tag* RFID pasiva de orden cero (ZOR) más compacta y con un mejor rango de lectura para utilizarse en la banda de UHF.

CAPITULO 1 . Fundamentos teóricos de RFID

Identificación por Radio Frecuencia (RFID, *Radio Frequency Identification*), se trata de un sistema de almacenamiento y recuperación de datos remotos que utiliza dispositivos denominados etiquetas. En este capítulo se analizan los fundamentos teóricos y las características de un sistema RFID, así como la clasificación de las etiquetas y las bandas de frecuencias a las que estas operan. También se realiza una breve comparación de esta magnífica tecnología con el conocido código de barras.

Un sistema típico de RFID está constituido por cuatro componentes principales: tarjetas, lectores, antenas y una computadora central. Una tarjeta RFID está compuesta por un microchip y una antena flexible instalada sobre una superficie plástica. El propósito de la antena es transmitir la información contenida en el chip, el chip suele ser imperceptible al ojo humano y posee una memoria interna para almacenar el número de identificación. El lector es utilizado para leer y escribir información en la tarjeta.

Para obtener una respuesta de una etiqueta RFID, el lector emite una onda de radio, cuando el *tag* se encuentra dentro del rango del lector, le responde identificándose a sí mismo. Estas señales pueden transmitir energía dependiendo del tipo de etiqueta. Las etiquetas pueden leerse a distancia sin contacto físico o sin estar visible con el lector. La distancia dentro de la cual un lector puede comunicarse con una etiqueta se denomina rango de lectura. Algunos lectores cuentan con un módulo programador que permite escribir información en las etiquetas.

1.1 Características del *tag*

Tanto la tarjeta como el lector están compuestos de dos elementos fundamentales: el chip y la antena. Las características del chip dependen de los fabricantes y no pueden ser modificadas por el usuario, de ahí que sea necesario adecuar la antena al IC (*Integrated Circuit* o Circuito Integrado, chip) a utilizar. La decisión de qué antena será la adecuada, dependerá de la aplicación RFID a desarrollar. En este caso deberá atender a las siguientes características.

- **Banda de frecuencias:** Dependerá de la regulación del país donde vaya a ser usado el *tag*.
- **Tamaño y forma:** Tiene que tener una serie de características de forma y tamaño para que pueda ser incorporado al objeto requerido para la aplicación (cajas de cartón, cintas de equipaje de avión, tarjetas de identificación, etc.) o incluso en una etiqueta impresa.
- **Aplicaciones con movilidad:** Las tarjetas de RFID pueden ser utilizadas en situaciones donde, por ejemplo, las cajas viajen en una cinta transportadora a velocidades de 16.09 Km/h (4.47 m/s) [2]. En este caso el efecto Doppler a 915 MHz es menor de 30 Hz y no afecta al funcionamiento de RFID. Sin embargo, el *tag* está expuesto menos tiempo en el rango de lectura del lector, exigiéndole una mayor capacidad de lectura. En estos casos, el sistema RFID debe ser cuidadosamente planificado para asegurar una identificación fiable.
- **Coste:** La etiqueta de RFID debe ser un dispositivo de bajo coste. Esto impone restricciones en la estructura de la antena y en la elección de los materiales para su construcción, incluyendo el chip utilizado. Típicamente se utiliza como conductor el cobre, aluminio y la tinta de plata. Los dieléctricos utilizados pueden ser de poliéster flexible y sustratos rígidos como el FR4.
- **Fiabilidad:** La tarjeta de RFID debe ser un dispositivo fiable que pueda soportar las variaciones debidas a la temperatura, humedad, tensión, así como a los procesos de impresión y laminación.

Además de estas características existe un factor fundamental para el desarrollo de un *tag* de RFID: conseguir la adaptación conjugada entre la antena y el chip para que se le pueda conferir la mayor cantidad de energía al IC. Para conseguir la adaptación entre ambos es necesario que la parte compleja de la impedancia de la antena y del chip se cancelen mutuamente, con el objetivo de tener como resultando una impedancia únicamente real. Si la adaptación no es conjugada, la transmisión de potencia no será máxima por la aparición de una parte parásita imaginaria en la impedancia, reduciendo el rango de lectura de la tarjeta. Generalmente las antenas han sido diseñadas para impedancias de 50 ó 75 Ω , pero los chips RFID tienen principalmente impedancia de entrada compleja, lo que implica que es mucho más difícil adaptar y, además, añadir una red de adaptación externa no es del todo deseable debido a las limitaciones de espacio.

1.2 Características del lector

No es necesario que el lector tenga una miniaturización excesiva, no es un sistema autónomo y portable, y no es necesaria una producción en masa. Esto es debido a que el lector suele ser un sistema que permanece fijo en un emplazamiento con toda la energía necesaria a su alcance, para ser capaz de gestionar multitud de tarjetas. El mismo consta de ciertas características que son imprescindibles:

- **Banda de frecuencias:** Dependerá de la regulación del país donde vaya a ser usado el sistema RFID. De todas formas, la consecución de una antena que abarque toda la banda UHF de RFID será preferible para la configuración del sistema, implementación y reducción de costes.
- **Rango de lectura:** Será necesaria la transmisión de la suficiente potencia por parte del lector para que la tarjeta sea capaz de activarse. Esto no será un gran problema en la consecución del lector ya que puede ser fácilmente modificable. Por ello esta característica queda ligada principalmente a la tarjeta y a su diseño.
- **Aplicaciones con movilidad:** El lector debe ser capaz de identificar a las tarjetas del sistema aunque se encuentren moviéndose a cierta velocidad. El lector deberá tener la suficiente velocidad de proceso como para identificar las tarjetas que crucen a gran velocidad por su zona de funcionamiento.
- **Coste:** Dado que no se requiere de una fabricación masiva de lectores, debido a que con uno se pueden controlar multitud de tarjetas, su coste no será un factor limitante en el desarrollo del sistema.
- **Fiabilidad:** Al igual que la tarjeta de RFID, el lector debe ser un dispositivo fiable que pueda soportar las variaciones debidas a la temperatura, humedad, etc.

En cuanto a las características físicas de la antena:

- **Polarización:** Debe tener polarización circular debido a la incontrolable orientación que pueda tener la tarjeta. De esto deriva otro factor importante, la razón axial, que deberá ser aproximadamente 1 para la obtención de polarización circular.
- **Ganancia:** Para el lector no es necesario un patrón omnidireccional como ocurría en las tarjetas ya que debido a su emplazamiento fijo será posible apuntar la antena a la zona de paso de las tarjetas. Es decir, podrá adquirir forma lobular haciendo que a menor ancho de haz se consiga mayor directividad, y por tanto, mayor ganancia [3]. Con una alta ganancia se consigue un mayor rango de

lectura, aunque se reducirá el radio de lectura del lector. Por tanto será necesario buscar un compromiso entre ambas características.

- **Adaptación de impedancias:** La adaptación conjugada entre el chip del lector y la antena utilizada será un factor importante para el traspaso de la mayor cantidad de energía entre el chip y la antena y viceversa. Debido que la sensibilidad del lector es generalmente mayor que la de la tarjeta y que es posible utilizar elementos que amplifiquen la señal recibida sin que esto suponga un gran problema, así como redes de adaptación externas, no será un factor limitante en la construcción de un sistema RFID.

1.3 Clasificación de los sistemas RFID

Los sistemas RFID, en concreto las tarjetas, se clasifican en 4 grupos fundamentales:

- Clase 1: Pasivos.
- Clase 2: Pasivos, con mayor memoria que la clase 1.
- Clase 3: Semipasivos.
- Clase 4: Activos.

La diferencia principal entre las tarjetas que operan en el modo pasivo y las tarjetas que operan en el modo activo recae en el hecho de que las tarjetas que operan en el modo pasivo no poseen un sistema de alimentación, como baterías, que alimentan el chip encargado de modular y conformar la señal correspondiente que será transmitida al lector con la información requerida. Por tanto, las tarjetas que operan en el modo pasivo, la alimentación del chip es inducida a partir de la señal de RF enviada por el lector.

Las tarjetas que operan en el modo activo requieren de dicha alimentación de modo que cuando el voltaje recibido supera un umbral determinado el tarjeta se despierta, y cuando no se supera el umbral o se finaliza la transmisión, la tarjeta se duerme [4]. Con la batería también se alimenta a la memoria que contienen las tarjetas para la retención de datos y se permite una mayor distancia entre la tarjeta y el lector, denominado rango de lectura, así como la transmisión de otro tipo de datos y no sólo el ID. Sin embargo tienen numerosas desventajas, tales como batería finita, mayores dimensiones y alto coste [5].

Las tarjetas semipasivas son más baratas que las activas pero más caras que las pasivas, con prestaciones intermedias entre ambos. Pueden enviar mayor cantidad de información que los pasivos y casi tanto como los activos, mientras que su tamaño es más reducido

que los activos. Para ello poseen una pequeña batería que enciende el IC apoyándose en la potencia inducida de la señal RF enviada por el lector. Es decir, este tipo de tarjetas son especialmente atractivas si se puede generar energía eficientemente a través de la señal RF recibida [5].

Un resumen de las características de las tarjetas pasivas y las activas se pueden observar en la siguiente tabla:

Tabla 1.1. Principales características de tags pasivos y activos

| CARACTERISTICA | CIRCUITO PASIVO | CIRCUITO ACTIVO |
|----------------------|------------------------|--------------------------------|
| ALCANCE | 0.01-10m | 10-100m |
| ALIMENTACION | Campo magnético (RF) | Batería |
| TIEMPO DE VIDA | Ilimitado | Limitado por la batería |
| COSTE | Aproximadamente \$9.75 | Aproximadamente \$40.00 |
| DIMENSIONES | Pequeño y muy pequeño | Grande (depende de la batería) |
| TIPO DE COMUNICACION | Señalización pasiva | Señalización activa |

Además de identificar los sistemas RFID en función de las características de las tarjetas, se realiza también una clasificación en función de los modos de operación:

- *Half-duplex*
- *Full-duplex*
- *Sequential procedures*

En cuanto a los primeros, cabe decir que la tarjeta y el lector se sincronizan de forma que en unos intervalos se realiza la transmisión lector- tarjeta y en los otros la transmisión tarjeta-lector, ya que se utiliza la misma frecuencia para ambos enlaces.

Los sistemas *full-duplex* permiten que la tarjeta y el lector estén transmitiendo al mismo tiempo ya que las frecuencias utilizadas para ambos enlaces son distintas, consiguiéndose así que no exista solapamiento. Generalmente la frecuencia correspondiente al enlace lector-tarjeta es mayor que la del enlace tarjeta-lector, ya que a mayor frecuencia las pérdidas por propagación son mayores, y además el enlace crítico es este último debido a que la potencia a la que transmite la tarjeta está muy limitada.

Los últimos sistemas se caracterizan en que el campo del lector se desconecta mientras la tarjeta transmite. El problema es que dicha pausa hace que se pierda potencia en el *transponder*, obligando a utilizar algún tipo de batería o capacitor.

Las ventajas e inconvenientes de utilizar uno u otro sistema dependen de la aplicación a desarrollar y de las características de la misma. Generalmente se asocian las tarjetas que trabajan en el modo pasivo con el sistema *half-duplex*. Estos sistemas tienen numerosos problemas ya que el lector debe transmitir mucha potencia para hacer que la tarjeta funcione, puesto que él debe generar su propia energía sin ayuda de baterías o similares [6]. Además, la tarjeta suele ser muy pequeña y requiere transmitir la suficiente potencia como para que la señal llegue con la intensidad necesaria para la correcta demodulación en el lector. Como ventajas, cabe destacar que los costes de producción no son muy elevados y no requiere del control y mantenimiento de una batería.

También se asocian los sistemas *full-duplex* con tarjetas que operan en el modo activo. El problema de estos es que los sistemas propuestos trabajan con un armónico para el enlace tarjeta-lector, lo cual implica una reducción de la potencia. Además, el aislamiento entre el transmisor y receptor debe ser grande para evitar interferencia por acoplo entre ambos radio-enlaces [6]. Como ventajas cabe decir que un sistema *full-duplex* permite transmitir una mayor cantidad de información en menos tiempo, y así no se requiere de un reloj para la sincronización entre el lector y la tarjeta, necesario para la transmisión por intervalos.

1.4 Bandas de frecuencias de RFID

Las bandas de frecuencia empleadas por la tecnología RFID, principalmente son las mostradas en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Frecuencias de operación de los sistemas RFID

| | Rango de operación | Rango de lectura | Consumo de energía | Rango de transferencia de datos | Tamaño de longitud de onda |
|-----------------------------|--------------------|------------------|--------------------|---------------------------------|----------------------------|
| LF (Baja Frecuencia) | 30 a 300 KHz | 10 cm | Bajo | Alto | 10 a 1Km |
| MF (Media Frecuencia) | 300 KHz a 3 MHz | 20 cm | Bajo | Alto | 1000 a 100m |
| HF (Alta Frecuencia) | 3 a 30 MHz | 1 m | Moderado | Alto | 100 a 10m |
| UHF (Ultra Alta Frecuencia) | 300 MHz a 3 GHz | Hasta 3 m | Moderado | Rápido | 1m a 1dm |

| | | | | | |
|-----------------------------------|------------|------------|----------|--------------|-----------|
| SHF (Súper Ultra Alta Frecuencia) | 3 a 30 GHz | Hasta 10 m | moderado | Súper rápido | 1dm a 1cm |
|-----------------------------------|------------|------------|----------|--------------|-----------|

Cuando la frecuencia aumenta, se disminuye el umbral de la longitud de la onda, como se puede observar en la tabla mostrada, en la tecnología RFID, va desde 1Km con baja frecuencia hasta 1cm en súper ultra alta frecuencia. La comunicación se realiza entre un transmisor y un receptor, ambos contienen una antena para poder realizar la comunicación para la transmisión de los datos.

Los datos se envían mediante una modulación, en el que se modifica la frecuencia o amplitud para poder realizar la transmisión. En el caso de la modulación por amplitud (AM), se altera la altura de la onda, cuando se está en presencia de un 1 lógico existe amplitud de onda y en cero lógico no hay señal. En la modulación por frecuencia (FM) la alteración se presenta en la frecuencia de la onda, siendo la onda menos frecuente en la representación del cero lógico y más frecuente en la representación del 1 lógico. En la modulación por fase altera los estados electromagnéticos de la onda, en cada cambio de estado se presenta una alteración de la onda, como se muestra en la Figura 1.1.

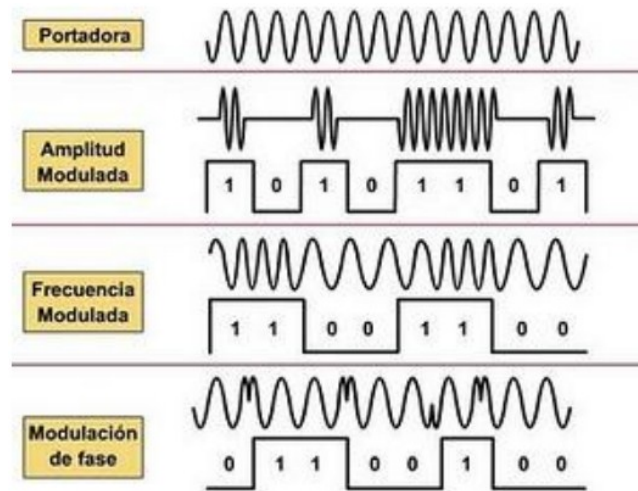


Figura 1.1. Tipos de modulación de la tecnología RFID. (Fuente: [6])

Para la realización de la comunicación electromagnética existen dos tipos de mecanismos, que dependerán de la distancia y la frecuencia que utiliza para la comunicación, estos mecanismos son:

- *Far-Field* (campo lejano): está basado en campos electromagnéticos, utilizado para la comunicación a larga distancia o bien para altas frecuencias, es utilizada para entornos líquidos o metálicos y se utiliza en etiquetas de ultra alta frecuencia.
- *Near-Field* (campo cercano): está basado en campos magnéticos para cortas distancias o para bajas frecuencias, es utilizado en etiquetas de altas frecuencias.

La antena de la etiqueta es un factor que brinda la información de que se está en presencia de un campo lejano o cercano. En el caso del campo lejano el tamaño de la antena debe ser la mitad de la longitud de onda. La polarización de la antena es otro factor debido a que consiste en la figura geométrica que traza el extremo del vector campo eléctrico a cierta distancia de la antena al variar el tiempo, por lo tanto existen dos tipos de antenas de campo lejano, la lineal y la circular:

- Polarización lineal: la energía es radiada de forma fija en dirección lineal, puede ser horizontal, vertical, más de 45° y menos de 45° . La polarización lineal genera una señal estrecha, requiriendo de mayor precisión en el alineamiento entre las antenas.
- Polarización circular: la energía rota de manera circular, si el sentido del giro del campo magnético es en el sentido de las manecillas del reloj se denomina giro dextrógiro y en caso contrario giro levógiro. Esta polarización genera un haz de señal muy ancha por lo que el alineamiento de este tipo de antenas es menos crítico, el problema de la polarización circular es el rango de alcance que es bastante reducido.

1.5 Funcionamiento general de RFID

Esta tecnología extiende el funcionamiento de un código de barras pero que podemos manipular a nuestras necesidades desde la identificación de objetos, hasta conocer en una persona todos los datos posibles, ya que es posible modificar y reprogramar los circuitos RFID a nuestras necesidades.

El lector transmite una señal modulada, a través del enlace de radio, que es recibida por el *transponder*, el cual demodulará la señal y retransmitirá la información pertinente al lector mediante otra señal modulada. Para que la tarjeta sea capaz de modular y demodular la señal será necesario que esté provisto de un chip. Dicho chip será alimentado a través de la transmisión de una onda continua de RF, mediante la

conversión de su potencia en DC para las tarjetas que trabajan en el modo pasivo [1], mientras que para las tarjetas que trabajan en el modo activo se alimentará el chip mediante una batería adicional.

El envío de información de la tarjeta al lector se puede realizar de tres maneras diferentes [4]:

- ✓ *Backscatter* o reflexión: La frecuencia de la onda reflejada por la tarjeta es la misma que la frecuencia del transmisor del lector.
- ✓ *Load modulation*: El campo del lector es inducido por la tarjeta, siendo la misma frecuencia para ambos enlaces.
- ✓ Uso de subarmónicos ($1/n$ veces) y la generación ondas armónicas (n -veces) en el *tag*, es decir, la frecuencia diferente para los dos enlaces.

El *backscatter* es un sistema *half-duplex* y utiliza una tarjeta que opera en el modo pasivo (compuesto por el chip específico y la antena, ambos con impedancia compleja). El chip se alimenta a través de la señal de RF transmitida por el lector en el momento en el que no está modulando, y la tarjeta devuelve la información mediante la variación de su impedancia de entrada entre dos estados, modulando así la señal de backscatter. La variación de la impedancia del chip con la potencia y la frecuencia puede afectar drásticamente a las características de la tarjeta. Así, una adecuada adaptación entre la antena y el chip es muy importante en sistemas RFID, afectando por ejemplo al rango de lectura. La señal transmitida en el enlace lector-tarjeta posee periodos de onda continua (CW, *Continuous Wave*) para activar la tarjeta, y periodos de señal modulada para la petición de información a la tarjeta, tal y como aparece en la Figura 1.2. En el enlace tarjeta-lector la información es devuelta durante uno de los periodos de onda continua, que es cuando la impedancia de la tarjeta modula la señal por backscatter [7].

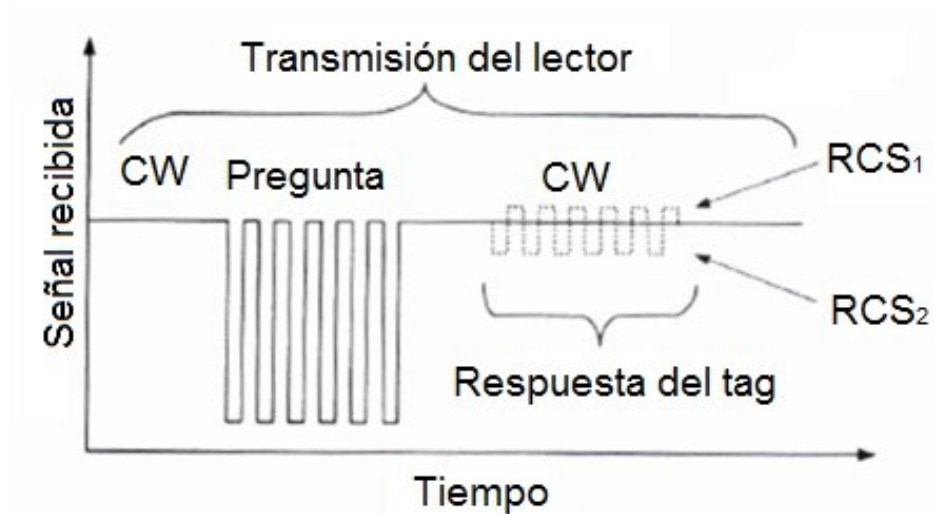


Figura 1. 2. Intercambio de información entre el reader y el tag en RFID. En el momento de la transmisión de la onda continua (CW) es cuando el tag responde mediante backscatter. (Fuente: [7])

La retransmisión por backscatter presenta numerosas ventajas, tales como su bajo precio y su reducido tamaño. Existen otros sistemas, como los que utilizan las tarjetas que operan en el modo activo, que presentan enormes ventajas de las cuales carecen las que operan en el modo pasivo.

Habiendo analizado a grandes rasgos el modo de funcionamiento de RFID, uno de los aspectos importantes a tener en cuenta es la cantidad de energía recibida en la tarjeta. De ello dependerá la posibilidad o no de generar la suficiente energía para que la tarjeta funcione adecuadamente. Dicha energía viene representada como P_{Ci} en la ecuación (1.1), la cual depende de los siguientes factores:

- P_{Ci} : potencia recibida por la etiqueta RFID.
- P_t : potencia transmitida por el lector RFID.
- G_r : ganancia de la antena de la etiqueta.
- G_t : ganancia de la antena del lector.
- λ : longitud de onda del espacio libre de la frecuencia de funcionamiento del lector.
- R : distancia entre el tag y el lector (a mayor distancia mayor atenuación de la señal).
- τ : coeficiente de transferencia de energía, o factor de diferencia de impedancia ($0 \leq \tau \leq 1$) entre la impedancia de la antena en la etiqueta y la impedancia de entrada del ASIC (Circuito integrado de aplicación específica) en la etiqueta.

$$P_{CI} = P_t \frac{G_r G_t \lambda^2}{(4\pi R)^2} \tau \quad (1.1)$$

Donde el coeficiente de transferencia de energía es:

$$\tau = \frac{4R_{CI}R_A}{|Z_{CI} + Z_A|^2} \quad (1.2)$$

Con (1.1) se podrá realizar una estimación de la potencia de transmisión del lector sabiendo la potencia mínima necesaria para que el chip funcione. Además también se puede observar que a mayor distancia y/o mayor frecuencia, la potencia recibida es menor.

De (1.1) se deriva el concepto de rango de lectura, que se define como la máxima distancia desde la cual la tarjeta puede ser detectada. Esta distancia se corresponde a la máxima distancia desde la cual el la tarjeta recibe la suficiente energía para activarse y, posteriormente, retransmitir la señal al lector. Por otro lado, también puede definirse como la máxima distancia desde la cual el lector puede detectar la señal retransmitida por la tarjeta. El rango de lectura será la distancia más pequeña de las dos. Generalmente es la primera, ya que la sensibilidad del lector es normalmente más alta [8]. Por ello se define P_{CI} como la mínima potencia necesaria para que el chip de la tarjeta funcione, es decir, $P_{CI} = P_{TH}$. Nótese como en términos de rango de lectura el enlace crítico es el lector-tarjeta debido a la poca sensibilidad de la tarjeta. Sin embargo, para la elección de la frecuencia de ambos enlaces, el crítico es el enlace tarjeta-lector, para reducir las pérdidas por propagación, y debido a la limitada potencia de transmisión de la tarjeta. Por eso se confiere una menor frecuencia de trabajo para este último. Despejando de (1.1) y asumiendo que el rango se corresponde a la máxima distancia desde la cual la tarjeta recibe la suficiente energía para activarse (enlace lector-tarjeta), se obtiene el rango de lectura R , mostrado en la ecuación (1.3).

$$R = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{G_t G_r P_t \tau}{P_{CI}}} \quad (1.3)$$

Por lo tanto el rango de lectura será inversamente proporcional a la frecuencia de trabajo en el enlace lector-tarjeta y a la potencia mínima necesaria para activar la tarjeta; y directamente proporcional a la ganancia de ambas antenas y a la potencia de transmisión del lector, además de los coeficientes de reflexión. Las pérdidas por polarización serán

fijas e igual a -3 dB. La obtención de un gran rango de lectura pasa por elegir adecuadamente los valores de potencia del lector, ganancia del lector, ganancia de la antena de la tarjeta y de los coeficientes de reflexión. Generalmente en la literatura se define el rango de lectura de acuerdo a la ecuación (1.4) [9].

$$R_{\max} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{G_t G_r P_t \tau}{P_{th}}} \quad (1.4)$$

La ecuación (1.4) es útil para los diseñadores para determinar el alcance máximo de la etiqueta. Normalmente, el enfoque por un diseñador es maximizar el Rmax. Una forma de lograr esto es para minimizar el desajuste de impedancias entre la antena de la etiqueta y el ASIC o diseñar una antena de recepción en la etiqueta de RFID con una ganancia maximizada Gr.

1.6 Antenas en el sistema RFID pasivo

El tipo de antena de la etiqueta pasiva está relacionado con su aplicación, por ejemplo: el tipo de material al cual se adherirá la etiqueta, las mediciones del objeto que se desea identificar y la frecuencia de operación. En forma general sus características pueden ser: delgadas, flexibles, con una impedancia estable (en la frecuencia de operación, con conectores asociados al CI), tamaño reducido (respecto a la longitud de onda), entre otros.

1.6.1 Parámetros importantes en las antenas de etiquetas de RFID pasivas

En el diseño de las antenas de etiquetas de RFID pasivas el aspecto fundamental es su cobertura, que la define principalmente la distancia máxima de lectura (abordada en el epígrafe anterior), la ganancia y el acoplamiento de impedancia de la antena-CI.

- **Ganancia**

La ganancia de una antena se define como la razón de la intensidad de radiación en una dirección dada respecto a la intensidad de radiación generada por una antena isotrópica (ideal). Para el caso de los sistemas RFID pasivos conociendo la potencia de transmisión del lector, el campo de lectura está limitado por la ganancia de la antena de la etiqueta y la frecuencia de operación. Si la energía de RF que recibe la etiqueta puede ser re-radiada, la densidad de potencia (S_1) en la etiqueta a una distancia R, se puede calcular como se muestra a continuación [10].

$$S_1 = \frac{G_L P_L}{4\pi R^2} \quad (1.5)$$

Donde G_L es la ganancia del lector y P_L es la potencia de transmisión del lector.

La potencia recibida por la etiqueta se determina como se muestra a continuación.

$$P_e = S_1 A_e \quad (1.6)$$

Donde A_e es el área efectiva y se determina como:

$$A_e = \frac{G_e \lambda^2}{4\pi} \quad (1.7)$$

Donde G_e es la ganancia de la etiqueta.

Agrupando las ecuaciones anteriores se determina la potencia recibida en la etiqueta, quedando definida como:

$$P_e = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_L G_e \quad (1.8)$$

Donde P_e represente la potencia de recepción de la etiqueta.

La densidad de potencia que recibe el lector cuando la etiqueta responde se puede calcular como:

$$S_2 = \frac{G_e P_e}{4\pi R^2} \quad (1.9)$$

A partir de la ecuación (1.9) se puede determinar la potencia que recibe el lector teniendo que:

$$P_{ret} = S_2 A_L = S_2 G_L \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (1.10)$$

entonces

$$P_{ret} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^4 G_L^2 G_e^2 P_L \quad (1.11)$$

Como normalmente se conoce la potencia PIRE (Potencia isotrópica radiada efectiva), se calcula como $P_{PIRE} = G_L P_L$, finalmente la potencia en el lector cuando una etiqueta responde se calcula por:

$$P_{ret} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^4 G_e^2 G_L P_{PIRE} \quad (1.12)$$

Como se puede observar en la ecuación (1.12) para una frecuencia determinada, la potencia recibida por el lector es inversamente proporcional a la distancia a la cuarta y directamente proporcional al cuadrado de la ganancia de la antena de la etiqueta. Entonces para tener la máxima distancia de lectura el único parámetro a controlar es la ganancia de la antena de la etiqueta, de aquí su importancia.

- **Acoplamiento de impedancias**

En la etiqueta RFID pasiva el acoplamiento de impedancias entre la antena y el CI determinan su funcionamiento óptimo. El circuito equivalente que representa dicho acoplamiento se muestra en la figura 1.3.

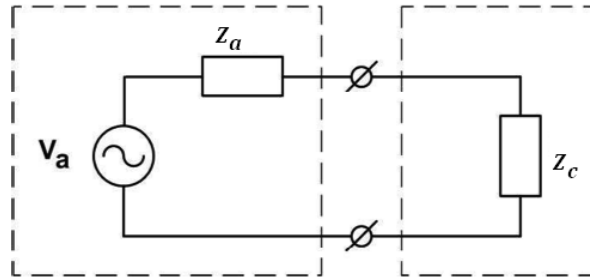


Figura 1.3. Circuito equivalente del acoplamiento de impedancias. (Fuente: [10])

Como se puede observar en la figura 1.3 el acoplamiento óptimo se obtiene para la máxima transferencia de energía, para lograrlo es necesario primero conocer la impedancia de los circuitos integrados el cual en primera instancia es un dato específico del CI. En la tabla 1.3 se muestran varios tipos de CI para etiquetas de RFID pasivas, donde se especifica el fabricante y su impedancia. Estos circuitos se seleccionan por tener el mismo protocolo de comunicación de acuerdo a la norma de la IEPC Global [10].

Tabla 1.3. Circuitos integrados comerciales de RFID

| Modelo | Impedancia de entrada |
|-------------------------|-----------------------|
| Philips EPC 1.19 Gen2 | 17.5-j332.6 |
| Atmel ATA5590 | 6.7-j206 |
| Texas Instruments Gen 2 | 13.5-j60 |

| | |
|--------------------|----------|
| MM9647 NSC | 73-j113 |
| EPC1.19G2 Phillips | 16-j315 |
| NXP Uncode Gen2 | 16-j380 |
| ST XRA00 | 6.7-j198 |

El comportamiento del acoplamiento de impedancias entre una antena y el CI se muestra en la figura 1.4, donde se tiene la impedancia de la antena y el CI (grafica superior) y la respuesta de potencia de la etiqueta (grafica inferior) en función de la frecuencia. La máxima respuesta de potencia (resonancia de la etiqueta) se obtiene en el punto de acoplamiento de impedancias óptimo, que es el cruce cuando la reactancia del CI es igual a la reactancia de la antena ($X_{CI}=X_a$).

Para cuantificar el acoplamiento existente, de acuerdo al circuito equivalente de la figura 1.3, donde:

$$Z_{CI} = R_{CI} + jX_{CI} \tag{1.13}$$

$$Z_a = R_a + jX_a \tag{1.14}$$

Donde Z_{CI} es la impedancia del circuito integrado y Z_a es la impedancia de la antena.

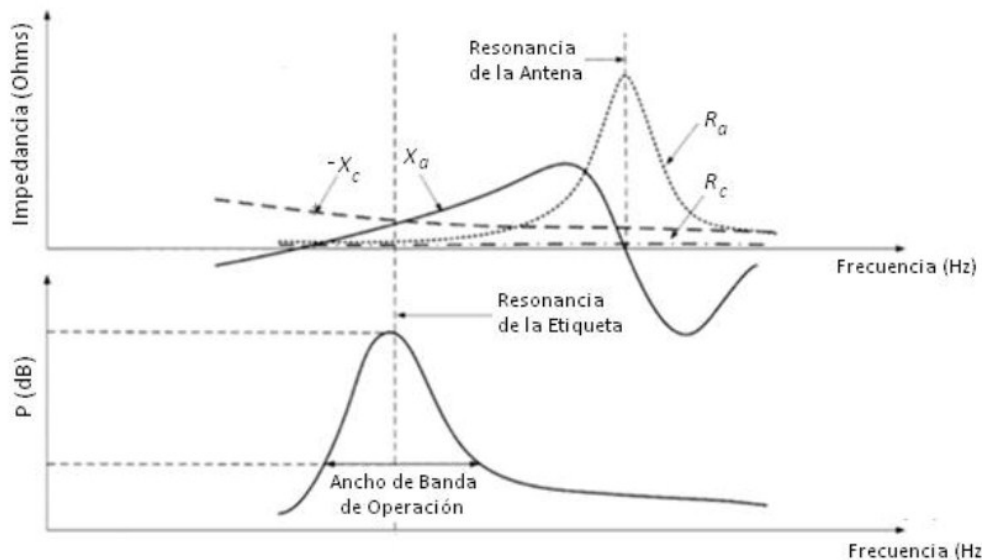


Figura 1.3. Impedancia de la antena y el CI y su relación con el ancho de banda de operación de la etiqueta. (Fuente: [10])

La potencia disponible (P_{CI}) que incide en el CI generada por la antena está dada por:

$$P_{CI} = P_a \tau \quad (1.15)$$

Donde P_a es la potencia disponible de la antena y τ es el coeficiente de transferencia de energía.

1.7 Identificador de tarjetas RFID

El objetivo de cada etiqueta es tener un objeto el cual se pueda rastrear donde se encuentre y que también dada su característica poder modificar mediante software la programación de cada etiqueta, para esto cada etiqueta cuenta con un código de producto al cual se le denomina EPC (*Electronic Product Code*), el cual es un número asignado a cada etiqueta para cada objeto con la tecnología RFID. Este código fue desarrollado por *Auto ID Center* en el año 2000 el cual es un protocolo de carácter universal, en donde cada etiqueta tendrá un número propio y único [11].

El código EPC puede tener varios tamaños, anteriormente se utilizaban etiquetas de 64 y 96 bits, actualmente se utilizan de 128 y 256 bits. Sin embargo con la etiqueta de 96 bits es suficiente, y de buen funcionamiento para niveles básicos de localización e identificación, la estructura más adecuada para este tipo de etiquetas son para la norma EPC Global y consta de cuatro partes principales, como se muestra en la Figura 1.4.



Figura 1.4. Formato de EPC. (Fuente: [11])

Encabezado: identifica la versión numérica del código por sí mismo.

Administrador EPC: identifica una empresa que es responsable de mantener la Categoría de objeto y Número serial. EPC Global asigna el Administrador General a una entidad, asegurando que cada uno de estos números sea único.

Clase de objeto: representa el tipo exacto de objeto a identificar.

Número Serial: representa un único identificador para el ítem dentro de cada categoría de objeto. La entidad administradora es responsable por la asignación unívoca de números seriales no repetitivos para cada instancia dentro de cada categoría de objeto.

1.8 Comparación entre RFID y el código de barras

El método de lectura utilizado por los lectores ópticos de código de barra requiere una verificación visual directa. El lector indica cuándo obtiene una buena lectura dentro de su rango, y una mala lectura es inmediatamente asociada con una etiqueta y un ítem específicos. Por otro lado la lectura por RFID no requiere línea de visión para obtener la información de la etiqueta. La señal de la frecuencia de radio (RF) es capaz de viajar a través de la mayoría de los materiales. Esto es particularmente ventajoso en las operaciones de recepción de mercaderías en depósitos y en aplicaciones donde la información debe ser recolectada a partir de ítems que tengan una orientación heterogénea. Un lector RFID es capaz de distinguir e interactuar con una etiqueta individual a pesar de que múltiples etiquetas se encuentren dentro del rango de lectura dado. No obstante, la discriminación de etiquetas no provee la ubicación física absoluta de un ítem que sí ofrece el código de barras cuando el objetivo es un punto específico en la línea de empaque.

Las etiquetas RFID pueden ser leídas con mayor velocidad que las etiquetas de código de barras en grados teóricos de 1.000 por segundo o más. Esto supera ampliamente la velocidad de lectura a nivel de cada unidad que posee el código de barras.

Para lograr una mayor protección, las etiquetas RFID pueden ser insertadas en sustratos de plástico duro u otros materiales. A pesar de que son significativamente más duraderas que las etiquetas de papel de código de barra, ambas dependen del adhesivo que las mantiene intactas y pegadas a un ítem. La naturaleza de las etiquetas RFID les permite perdurar más que las de código de barras.

El talón de Aquiles de una etiqueta RFID es el punto de unión de la antena con el chip. Un corte que dañe el punto de unión inutilizará la etiqueta, mientras que el código de barras solo sería levemente degradado.

Las etiquetas RFID son capaces de realizar operaciones de lectura y escritura, permitiendo la actualización de información en tiempo real de un ítem que se mueve a lo largo de la cadena de abastecimiento.

Las etiquetas RFID retienen información en forma cautiva, ofreciéndola únicamente a través de un lector seteado para recibir esos datos. Los códigos de barra, por otro lado, tienen usualmente un formato de legibilidad de caracteres humanos adjuntos. Esto permite una recuperación directa en caso de que el código de barras falle al leer. La combinación de etiquetas RFID conteniendo código de barras y caracteres humanamente legibles ofrece la mejor alternativa de redundancia e integridad de la información.

A continuación se muestra una tabla en la que se detalla una comparación entre el código de barras y la tecnología RFID.

Tabla 1.4. Comparación entre el código de barras y RFID

| Características | Código de barras | RFID |
|-----------------|--|---|
| Capacidad | Espacio limitado | Almacena mayor cantidad de información |
| Identificación | Estandarizada | Unívoca por producto |
| Actualización | Sólo lectura | Lectura/escritura |
| Flexibilidad | Requiere línea de visión para la lectura | No requiere línea de visión para lectura |
| Lectura | Una lectura por vez | Lectura simultanea |
| Tipo de lectura | Lee solo en superficie | Lee a través de diversos materiales y superficies |
| Precisión | Requiere intervención humana | No requiere intervención humana, 100% automático |
| Durabilidad | Puede dañarse fácilmente | Soporta ambientes agresivos |

1.9 Limitaciones de RFID

La tecnología RFID presenta algunas limitaciones, entre las más comunes se encuentran las que se enumeran y se comentan a continuación:

1) Pobre rendimiento con objetos absorbentes

La utilización de frecuencias de UHF elevadas o de microondas, con objetos producidos con materiales metálicos, materiales absorbentes (como el agua) o embalados dentro de un material de estas características, probablemente genere fallas parciales o totales al intentar leer los datos de la tarjeta. Existen etiquetas especialmente diseñadas para aliviar algunos de los problemas de lectura para este tipo particular de materiales. Se espera que el desarrollo de la tecnología reduzca los problemas comunes asociados con objetos opacos y absorbentes en el corto plazo.

2) Impactada por el entorno operativo

Si el entorno operativo tiene grandes cantidades de metal y líquidos (entre otros), estos afectarán la exactitud de la lectura de las etiquetas, dependiendo de la frecuencia. Es recomendable en este tipo de ambientes asegurar una línea de visión directa entre las etiquetas y el lector. Aunque la distancia de lectura de la etiqueta, la energía generada por el lector y la configuración de la antena del lector son los parámetros principales que deben ser configurados en estos casos, una línea de visión ayuda a optimizar el rendimiento. En algunos casos no sería posible, por ejemplo, en un ambiente operativo donde hay elevado tráfico humano. El cuerpo humano contiene una gran cantidad de agua, el cual es absorbente RF en frecuencias UHF elevadas y de microondas. Por lo tanto, cuando una persona se encuentra entre una etiqueta y un lector, existe una elevada posibilidad de que el lector no pueda leer la etiqueta antes de que esta persona se aleje. Sumado a esto, la existencia de otros tipos de redes de trabajo inalámbricas dentro del ambiente operativo pueden interferir con la operación del lector. Motores eléctricos y controladores eléctricos pueden generar también fuentes de ruido que pueden impactar el desempeño del lector.

3) Limitación de lecturas múltiples

El número de etiquetas que un lector puede identificar en forma unívoca por unidad de tiempo es limitado. Actualmente un lector puede identificar un determinado número de etiquetas por segundo. Para alcanzar este número, el lector tiene que obtener múltiples respuestas de cada etiqueta por segundo. Esto se debe a que el lector utiliza algoritmos anti-colisión para identificarlas. Por lo tanto, respuestas repetidas por parte de las etiquetas son requeridas antes que un lector pueda determinar los datos de una etiqueta en forma unívoca.

4) Impacto de la interferencia del hardware

Los lectores RFID pueden generar colisiones si han sido instalados de manera inapropiada. Una colisión sucede cuando las áreas de cobertura de dos lectores se solapan y la señal de un lector interfiere con la del otro. Este problema debe ser considerado a la hora de realizar la definición e implementación de una solución RFID para asegurar el correcto funcionamiento de la misma. En caso contrario, la señal se degradará, afectando seriamente el rendimiento del sistema. Por lo tanto, la aplicación RFID debe tener un mecanismo inteligente de filtros para eliminar lecturas duplicadas de

etiquetas. A medida que la tecnología avance surgirán nuevas soluciones para esta cuestión.

5) Poder limitado de la energía RFID

La penetración de poder de la energía RFID depende básicamente de la potencia del transmisor del lector y del ciclo de operación, los cuales están regulados en varios países en el mundo. Por ejemplo, un lector puede fallar al leer algunas cajas en una pallet si son apiladas muy profundo, incluso si estas cajas son de materiales que afectan el uso de la radiofrecuencia. La única forma de obtener esta respuesta es a través de la experimentación, ya que resulta muy difícil, sino imposible, determinarlo teóricamente. Desafortunadamente, esta limitación continuará mientras existan restricciones y regulaciones internacionales en relación a la potencia del lector y los ciclos de operación.

6) Tecnología Inmadura

La maduración de la tecnología es una cuestión práctica que enfrenta hoy en día RFID. Una solución RFID será tan robusta como el hardware disponible actualmente lo permita. Los fabricantes están haciendo su mayor esfuerzo para desarrollar productos óptimos, pero la madurez total no será posible en el corto plazo. Por ejemplo, es común que las etiquetas pasivas UHF utilizadas actualmente en operaciones de la cadena de abastecimiento se dañen cuando son manipuladas, con un rango de fallas que se encuentra por encima del 10 por ciento.

1.10 Aplicaciones de RFID

RFID es una tecnología inalámbrica compacta y en auge para la identificación de objetos. RFID utiliza ondas electromagnéticas para transmitir y recibir información almacenada en una tarjeta para ser leída por un lector, haciendo que esta tecnología tenga mejores prestaciones que las formas convencionales de identificación. La misma posee grandes rangos de lectura, rápidas tasas de transferencia, la capacidad de incorporación de tarjetas en el interior de los objetos, innecesaria línea de visión y la capacidad de leer una gran cantidad de tarjetas de forma simultánea [4]. Es por ello que hoy en día, sean numerosas las aplicaciones derivadas de la tecnología RFID. Ejemplo de ello son las redes de sensores, utilizadas para la toma de temperatura en diferentes ubicaciones para control, aplicaciones en casas inteligentes, administración eficiente de la energía o seguridad industrial. Sin mencionar multitud de aplicaciones relacionadas con el sector

automovilístico, telefónico o de seguridad. La recopilación que se ha hecho en este documento es sólo una ínfima parte de los numerosos documentos que existen en la actualidad en referencia al uso de esta tecnología, y que vaticina ser una de las tecnologías con un gran auge en el futuro.

1.10.1 Seguridad

La tecnología RFID permite realizar un seguimiento en tiempo real para la mejora de las aplicaciones antirrobo, por ejemplo habilitando al distribuidor saber qué elemento ha sido movido y cuándo. RFID puede incluso disparar las alarmas y bloquear las puertas de acceso si fuese necesario. Un ejemplo más práctico de este sistema sería, por ejemplo, acoplar una tarjeta RFID (preferiblemente pasivo debido a sus beneficios y al coste reducido) a los objetos de mayor valor. Así, incorporando el lector cerca de los objetos etiquetados, cuando uno de ellos sale del estante, el lector detectará que ha sido extraído. Entonces, el lector transmitirá una señal de aviso al sistema principal que indicará a los demás lectores desplegados empezar la búsqueda de la tarjeta perdida. Cuando uno de ellos lo detecte se podrá activar, por ejemplo, una grabación de video del lugar donde se encuentra el objeto.

En la actualidad los objetos más falsificados corresponden a las prescripciones de medicamentos, billetes y artículos de lujo. Una solución de RFID pasa por asociar un código único a cualquier objeto para que pueda ser seguido a través de la cadena de suministro. En [12] proponen un *tag* ultra compacto para el seguimiento de los medicamentos, permitiendo almacenar su nombre, lugar de producción, fecha de caducidad, o incluso el tamaño y el color del paquete en el chip del *tag*. Por ello, si se escanea el contenido grabado en el chip y se comprueba que la información no concuerda con el paquete que se tiene delante, es que se ha falsificado.

La seguridad nacional representa una preocupación de elevada importancia para la sociedad actual. La inserción de paquetes peligrosos en aviones, coches o barcos por parte de terroristas puede suponer un gran peligro para las ciudades. Un *tag* activo de RFID con baterías recargables se puede acoplar a cada contenedor o paquete para realizar un seguimiento global del mismo vía GPS u otro tipo de sistemas. Cuando un paquete se descarga en un área no autorizada o experimenta una intrusión, el *tag* de RFID grabará tal información y la transmitirá al sistema central, dando mayor antelación a los sistemas de alarma.

1.10.2 Trazabilidad de alimentos

Esta aplicación se caracteriza por lo siguiente:

- Adjuntar una etiqueta con un único identificador en un ítem para realizar su seguimiento.
- Leer esta identificación en ubicaciones específicas mientras el ítem se mueve dentro de la planta.

El *tag* que identifica el producto, cuando es asociado con el tiempo y hora de la lectura y la información de la ubicación, puede proveer información en tiempo real sobre el paradero de este ítem en un momento específico. Esta información es utilizada para seguir el movimiento del objeto durante su ciclo de vida.

Lo que resulta de utilidad para determinar la responsabilidad del personal en la operación del depósito. Adicionalmente se pueden asociar varias acciones con la actividad de seguimiento, como la generación de una alarma si un objeto no está situado en una determinada ubicación en el momento preciso.

Las soluciones típicas de trazabilidad que se aplican al seguimiento del ítem utilizan *tags* pasivos de rango limitado. Este tipo de *tags* requieren que la etiqueta se mueva a través de distintos “puntos de control” para ser leídos.

Los fabricantes de alimentos pueden realizar la trazabilidad de un producto almacenado en un contenedor a medida que este se desplaza dentro de la planta y las respectivas áreas de procesamiento. RFID permite asegurar en tiempo real que el contenedor correcto haya sido enviado a la máquina correcta en la secuencia correcta.

En este tipo de industrias, un pallet normal tiene un contenido de humedad del 6 al 12 por ciento, pero un pallet fresco puede aproximarse al 30 por ciento de humedad. Esta cantidad de humedad puede causar una pérdida de energía en las etiquetas utilizadas en este tipo de industrias, lo cual es suficiente para limitar distancia de lectura en varios metros. Por este motivo los productos deben ser testeados a través de ensayos previos, para evitar sorpresas como el contenido de humedad.

Para establecer un sistema de trazabilidad RFID, se debe asegurar una forma de etiquetar cuidadosamente los contenedores de modo que las etiquetas no caigan dentro del producto y contaminen el sistema, a partir de su contacto con los alimentos. Las etiquetas deben resistir además condiciones de limpieza, vapor, y presión elevada.

1.10.3 Monitoreo y control de inventario

Las grandes líneas aéreas cuentan con un inventario de medio millón de partes, lo que representa más de un billón de dólares en materiales. Este control de los inventarios actualmente es realizado manualmente, resultando en un alto grado de error (y por lo tanto, un alto coste de mantenimiento de inventarios). Las etiquetas RFID que operan en el rango de frecuencia 13.56 MHz son recomendadas para este propósito porque pueden ser utilizadas en ambientes y productos metálicos. Sin embargo, este tipo de etiquetas tienen un bajo rango de lectura /escritura (menos de 1 metro).

1.10.4 Identificación y seguimiento de equipajes

Etiquetas RFID insertadas en etiquetas de identificación de equipaje aéreo pueden ser utilizadas para proveer una solución efectiva de seguimiento. Dado que una etiqueta RFID tiene capacidad suficiente para almacenar información sobre el equipaje y los datos de la ruta, la información está disponible localmente, evitando cualquier necesidad de acceso al sistema central o a bases de datos. Las etiquetas RFID pueden ser leídas (a diferencia de los códigos de barra) en cualquier orientación (sin importar que el equipaje se encuentre mezclado), resultando en una lectura más veloz y exacta en comparación con la lectura de código de barras.

Hasta aquí se han descrito las condiciones generales de un sistema de RFID. Se encontró que una de las formas para mejorar la eficiencia del sistema en general es desarrollar antenas más eficientes, ya que éstos están delimitados por las normas internacionales, así como de las características del CI establecidas por los fabricantes.

CAPITULO 2 . MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se estudian los avances en el diseño de antenas para etiquetas pasivas RFID, fundamentalmente en la banda de los UHF, que tienen como objetivo mejorar el desempeño general de esta tecnología. Se introduce el concepto de metamateriales, haciendo un especial énfasis en metamateriales planares consistidos de una línea de transmisión de guía de ondas coplanar (CPW, *coplanar waveguide*) basadas en SRR.

2.1 Tecnología RFID en la banda de UHF.

La tecnología RFID tiene un gran auge en la banda UHF, ya que en esta banda se han encontrado una serie de características idóneas para la identificación mediante ondas electromagnéticas.

La identificación de productos u objetos utilizando la banda de frecuencia UHF entre los 860 y 960 MHz no deja de ser el “bonsái” de las comunicaciones de radio porque se utilizan antenas de un grosor de micras y porque las potencias de emisión de los *tags* RFID no superan los 200 μ W.

2.1.1 Tipos de antenas incorporadas en las etiquetas RFID en UHF.

El tipo de antena utilizada en un *tag* depende de la aplicación, objetivo y la frecuencia de operación. Los *tags* de baja frecuencia (LF) normalmente se sirven de la inducción electromagnética. Como el voltaje inducido es proporcional a la frecuencia, se puede producir el voltaje necesario para alimentar un circuito integrado dado un número suficiente de espiras. Existen *tags* LF compactos (como los utilizados para identificación humana y animal, encapsulados en vidrio) que utilizan una antena en varios niveles (tres de 100-150 espiras cada uno) alrededor de un núcleo de ferrita.

En alta frecuencia (HF, 13.56 MHz) se utiliza una espiral de 5 a 7 vueltas y con un factor de forma parecido al de una tarjeta de crédito, para lograr distancias de decenas de centímetros. Estas antenas son más baratas que las LF ya que pueden producirse por medio de litografía en lugar de espiración, aunque son necesarias dos superficies de metal y una aislante para realizar la conexión cruzada del nivel exterior al interior de la espiral, donde se encuentran al condensador de resonancia y el circuito integrado.

Los *tags* pasivos en frecuencias ultra alta (UHF), que son los de nuestro interés en este trabajo, suelen acoplarse por radio a la antena del lector y utilizar antenas clásicas de dipolo. Las antenas dipolos, no obstante, no se ajustan muy bien a las características de los circuitos integrados típicos con alta impedancia de entrada y ligeramente capacitiva. Se pueden utilizar dipolos plegados o bucles cortos como estructuras inductivas complementarias para mejorar la alimentación. Los dipolos de media onda (16 cm a 915 MHz) son demasiados grandes para la mayoría de las aplicaciones, ya que los *tags* para uso en etiquetas no pueden medir más de 10 cm, por lo que hay que doblar las antenas para satisfacer las necesidades de tamaño.

También pueden usarse estructuras de banda ancha. La ganancia de las antenas compactas suele ser menor que la de un dipolo (menos de 2 dBi) y pueden considerarse isotrópicas en el plano perpendicular a su eje.

Los dipolos experimentan acoplamiento con la radiación que se polariza en sus ejes, por lo que la visibilidad de un *tag* con una antena de dipolo simple depende de su orientación. Los *tags* con dos antenas ortogonales (*tags* de doble dipolo) dependen mucho menos de ella y de la polarización de la antena del lector, pero suelen ser más grandes y caras que sus contrapartidas simples.

Pueden usarse antenas de parche para dar servicio en las cercanías de superficies metálicas, aunque es necesario un grosor de 3-6 mm para lograr un buen ancho de banda, además de que es necesario tener una conexión a tierra que incremente el costo comparado con estructuras de una capa más sencilla.

El diseño de la antena de un *tag* es una mezcla o combinación de ciencia y arte, sobre todo para los sistemas UHF. La mayoría de los diseños actuales se basan o han estado diseñados bajo sofisticados programas de modelación, añadiendo el conocimiento y la experiencia adquiridos en otras aplicaciones de radiofrecuencia. Las formas y tamaños de las antenas son múltiples y variados.

2.2 Línea de transmisión metamaterial basada en SRR.

Los metamateriales son estructuras artificiales que presentan características electromagnéticas únicas, con topología periódica o cuasi-periódica, los cuales poseen algunas propiedades controlables, que en ocasiones no es posible encontrar en la naturaleza. Dichas características han despertado el interés de la comunidad científica en

los últimos años. El descubrimiento de tales materiales está suponiendo el desarrollo de novedosos conceptos, dispositivos y aplicaciones, relacionados con campos tan diversos como seguridad militar, medicina, industria aeroespacial, telecomunicaciones, etc.

Este comportamiento electromagnético inusual es proporcionado por la permitividad (ϵ) y permeabilidad (μ) simultáneamente negativas, que caracterizan a estos materiales y los diferencian del resto.

La existencia de los metamateriales y sus características fueron teorizadas por primera vez en 1967 por el físico soviético Viktor Veselago. En su tesis [13], Veselago denominó a los materiales que presentaran permeabilidad y permitividad negativas, materiales LH (left-handed o zurdos), ya que demostró que al contrario de lo que ocurre con los materiales naturales (llamados right-handed (RH) o diestros), el vector de campo eléctrico, el vector de campo magnético y el vector de onda, forman una tríada zurda, lo que supone que la propagación de la onda se produzca en sentido contrario al flujo de energía, representado por el vector de Poynting. En la Figura 2.1 (a) se observa la tríada correspondiente a los metamateriales RH, donde se observa que el vector de onda y el vector de Poynting tienen el mismo sentido y, por tanto, la propagación de la onda se produce en el mismo sentido que el flujo de energía, esto es, alejándose de la fuente. En la Figura 2.1 (b) se observa la tríada zurda correspondiente a los materiales LH.

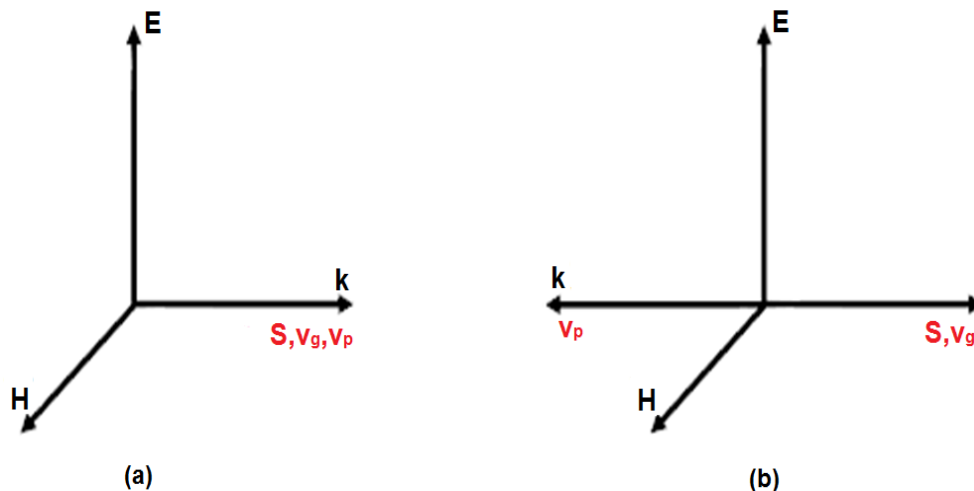


Figura 2.1. Medios RH (a) y LH (b).

Además de lo mencionado anteriormente, Veselago enumeró las propiedades que dichos materiales presentarían, entre otras, las inversiones de la ley de Snell (las ondas electromagnéticas viajan en dirección opuesta a la que normalmente toman cuando pasan

de un material a otro) y del efecto Doppler (para un detector que se aleja del emisor, la frecuencia detectada sería más grande que la emitida, al contrario de lo que sucede en medios convencionales).

En la Figura 2.2 se muestra la clasificación de los metamateriales en función de los valores de permitividad y permeabilidad, donde n es el índice de refracción, ϵ es la permitividad eléctrica y μ es la permeabilidad magnética.

El primer cuadrante hace referencia a materiales caracterizados por ϵ y μ positivas, es decir, a los dieléctricos convencionales. El índice de refracción es también positivo y real, y por ello, la dirección de refracción de la onda que se propaga a través de este material respeta la Ley de Snell [13].

A partir del índice de refracción se obtiene una constante de propagación positiva y real, ver ecuación 2.1, que conduce a la transmisión de ondas progresivas en dichos materiales.

$$\beta = \frac{\omega \sqrt{\epsilon_r \mu_r}}{c} \tag{2.1}$$

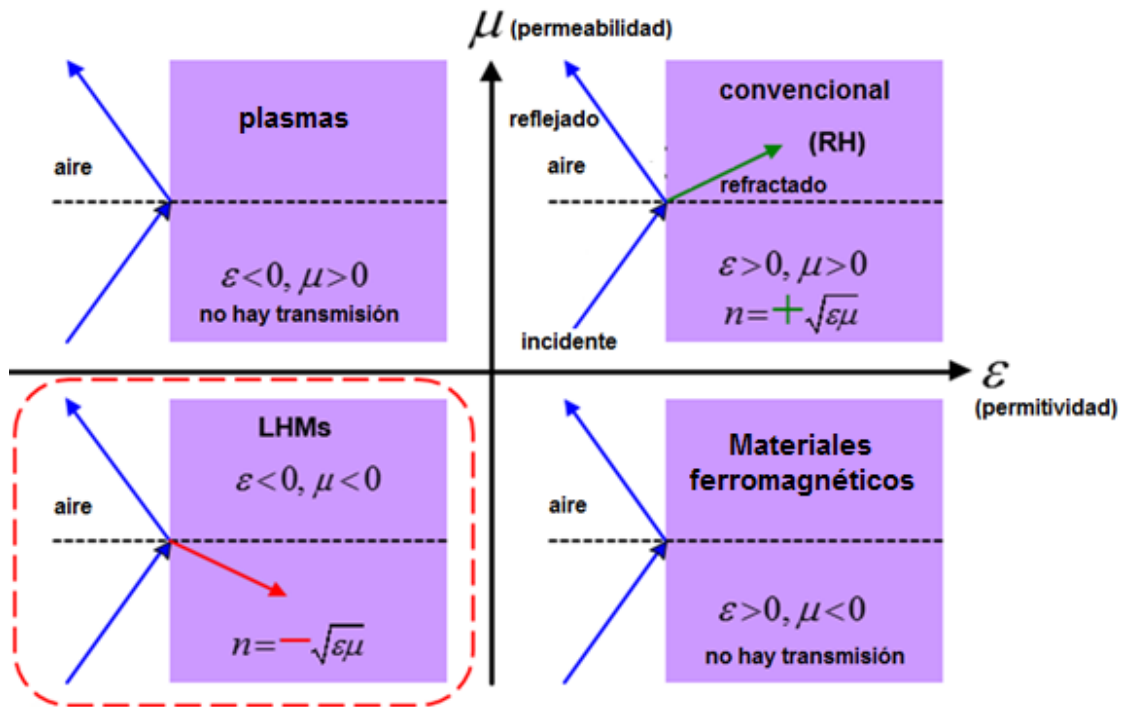


Figura 2.2. Clasificación de los materiales a partir de la permitividad y permeabilidad. (Fuente: [13])

En el segundo y cuarto cuadrante, la permitividad y la permeabilidad son negativa respectivamente, obteniéndose un índice de refracción y constante de propagación complejos. En consecuencia, se crean ondas evanescentes y no hay propagación de las ondas.

Los materiales del segundo cuadrante (plasma) muestran una permitividad negativa a muy alta frecuencia (THz) mientras que los materiales del cuarto cuadrante (ferrita) muestran una permeabilidad negativa a frecuencias mayores que las correspondientes a las microondas [13].

En el tercer cuadrante se observan los metamateriales con permeabilidad magnética y permitividad eléctrica negativas, y con un índice de refracción también negativo. El índice de refracción negativo conduce a que la refracción de la onda al atravesar el material se produzca en sentido contrario a la Ley de Snell. β es igualmente, real y negativa, por lo que se produce transmisión de ondas regresivas [13].

Veselago puntualizó que el campo eléctrico, el campo magnético, y el vector de propagación formarían una regla de la mano zurda contrario a la regla de la mano derecha obtenida en un medio convencional. Sin embargo, Veselago no pudo describir una estructura que presentara esas propiedades. Sólo se enfocó en mencionar que los plasmas presentan una permitividad negativa y especuló que un plasma magnético (no encontrado en la naturaleza) presentaría permeabilidad negativa.

No fue hasta unas tres décadas más tarde, cuando Smith y su grupo de investigación en la universidad de California, San Diego (USCD), concibieron empíricamente el primer metamaterial desarrollando una serie de celdas constituidas por dos anillos y sus estructuras ϵ -negativas/ μ -positivas y ϵ -positivas/ μ -negativas. El primer anillo aloja en su interior otro similar al primero, pero en sus extremos existen pequeñas aberturas puestas una en contra de la otra. En las siguientes figuras se muestran dichos metamateriales [14].

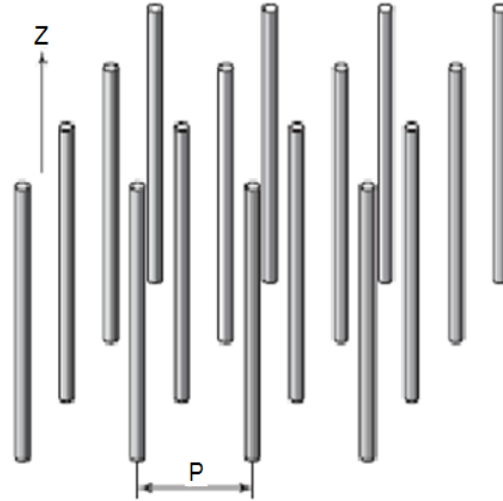


Figura 2.3. Estructura compuesta por delgados cables metálicos que presenta una ϵ negativa y una μ positiva. (Fuente: [14])

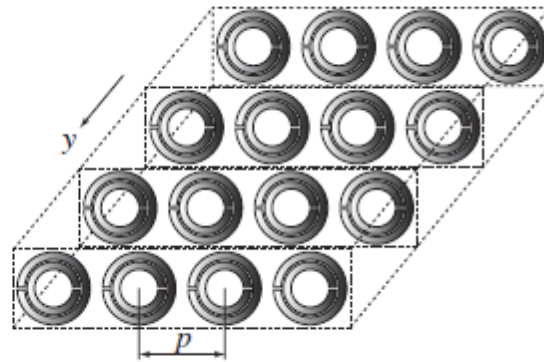


Figura 2.4. Resonador de anillos abiertos (Split-ring Resonator, SRR) que se caracteriza por una ϵ positiva y una μ negativa. (Fuente: [14])

Una posible solución para la síntesis de medios LHM es la de utilizar la superposición de materiales que posean algún parámetro negativo en un rango de frecuencias determinado con otro material que posea el otro parámetro negativo en dicho rango de frecuencias. De esta forma, se podrían conseguir las características del medio LHM. Para ello, veremos algunas topologías, con las que se tiene una cierta capacidad de controlar sus parámetros efectivos, de tal forma que resultaría factible conseguir que en un cierto rango de frecuencias mostrasen su permitividad ó su permeabilidad negativas.

El primer material LH fue construido mediante la superposición de la estructura de la figura 2.3 y la figura 2.4 para conseguir una ϵ y μ simultáneamente negativas. El resultado de este solapamiento se muestra en la Figura 2.5.

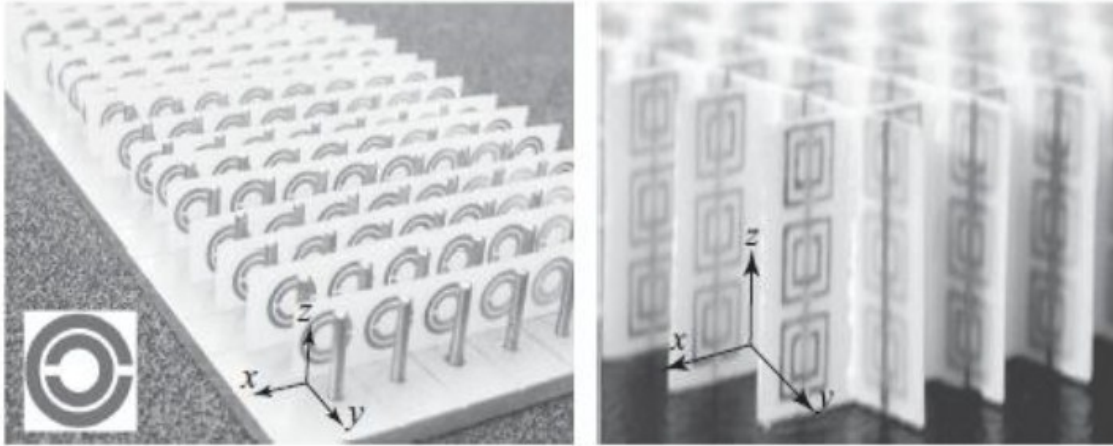


Figura 2.5. Primeras estructuras LH: a) Estructura monodimensional, b) Estructura bidimensional. (Fuente: [14])

Posteriormente, numerosos científicos han estudiado las características y aplicaciones de los metamateriales basados en SRRs.

A pesar de que las estructuras resonantes fueron la base de la implementación de los materiales LH, este tipo de estructuras implican numerosos inconvenientes.

Las estructuras resonantes son voluminosas y acarrear grandes pérdidas, además de proporcionar anchos de banda reducidos, por lo que su uso no es recomendable en aplicaciones a frecuencias de microondas. Como consecuencia, se hizo necesario encontrar una nueva forma de implementar metamateriales con un mejor rendimiento, o lo que es lo mismo, implementar metamateriales a partir de líneas de transmisión.

Dentro del campo de los metamateriales, nos encontramos varios tipos diferentes, como las estructuras componentes de cristales electromagnéticos, las cuales son periódicas con periodicidad comparable a la longitud de onda de la señal de trabajo. También nos encontramos los llamados medios efectivos, los cuales poseen un tamaño inferior al de la longitud de onda de la señal de trabajo. En los últimos años, los materiales conformados por medios efectivos han sido los más desarrollados, dado que las propiedades que poseen dichos materiales no existen en la naturaleza de forma espontánea. Un tipo de medio efectivo lo forman aquellos que están formados por elementos resonantes, los

cuales van a tener un tamaño muy reducido en comparación con la longitud de onda, dado que su efecto no viene determinado por un fenómeno de interferencia sino uno cuasi-estático [14].

2.3 Estructuras coplanares de guía de onda.

El término "coplanar" significa compartir el mismo plano, y este es el tipo de línea de transmisión donde los conductores de referencia están en el mismo plano que el conductor que lleva la señal. El conductor que lleva la señal se coloca en el centro con un conductor plano de referencia a cada lado como se muestra en la figura 2.6. La ventaja de tener ambos conductores en el mismo plano reside en el hecho de que es más fácil de montar componentes de parámetros concentrados entre los dos planos y es más fácil de realizar configuraciones de derivación y en serie.

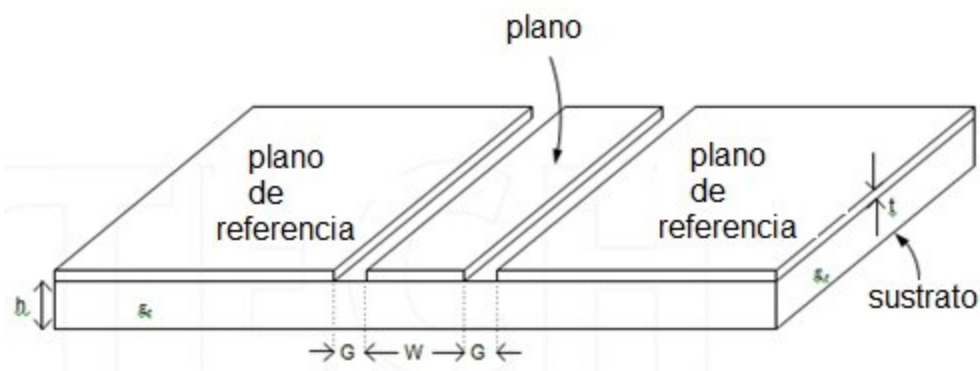


Figura 2.6. Línea de transmisión CPW en dieléctrico sin conexión a tierra. (Fuente: [16])

El condensador interdigital cargado fue propuesto por primera vez por Wen [15] y desde entonces se han utilizado ampliamente en las comunicaciones inalámbricas. La desventaja de la guía de onda coplanar (CPW, *Coplanar-waveguide*) es que puede ser difícil de mantener el mismo potencial entre los conductores de referencia y el de la señal a lo largo de la traza de la señal. Sin embargo muchos avances se han hecho mediante el uso de CPW, tales como nuevos filtros [16] y como la propagación zurda en líneas CPW, evidenciando las características de una estructura metamaterial.

De la figura 2.6 se derivan a continuación varias propiedades de la CPW-TL. Las constantes de atenuación y fase pueden derivarse mediante la realización de un análisis cuasi-estático de una CPW. La velocidad de fase y la impedancia característica pueden escribirse como [17]:

$$v_{cp} = c \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.2)$$

y

$$Z_{0cp} = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_{re}^t}} \frac{k(k')}{k_e} \quad (2.3)$$

Donde:

$$k_e = \frac{W_e}{W_e + 2G_e} \cong k + \frac{(1-k^2)\Delta}{2G} \quad (2.4)$$

$$k = \frac{W}{W + 2G} \quad (2.5)$$

$$\Delta = \left(\frac{1.25t}{\pi}\right) \left[1 + \ln\left(\frac{4\pi W}{t}\right)\right] \quad (2.6)$$

$$k' = \sqrt{1 - k^2} \quad (2.7)$$

$$\epsilon_{re}^t = \epsilon_{re} - \frac{0.7(\epsilon_{re} - 1) \frac{t}{G}}{k(k) / k(k') + 0.7t / G} \quad (2.8)$$

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \left[\tanh\left\{1.785 \log\left(\frac{h}{G}\right) + 1.75\right\} + \frac{kg}{h} \{0.04 - 0.7k + 0.01(1 - 0.1\epsilon_r)(0.25 + k)\} \right] \quad (2.9)$$

Donde W es la anchura del conductor central, G es la separación entre el conductor central y el conductor de referencia, ϵ_r es la permitividad relativa del dieléctrico, c es la velocidad de la luz y t es el grosor del conductor. K (k) es la integral elíptica completa de primera especie y la relación K (k) / K (k ') ha sido reportado en [17] como:

$$\frac{k(k')}{k(k)} = \frac{1}{\pi} \ln \left[2 \frac{1 + \sqrt{k}}{1 - \sqrt{k}} \right] \quad \text{para } 0.707 \leq k \leq 1 \quad (2.10)$$

y

$$\frac{k(k')}{k(k)} = \frac{\pi}{\ln \left[2 \frac{1 + \sqrt{k'}}{1 - \sqrt{k'}} \right]} \quad \text{para } 0 \leq k \leq 0.707 \quad (2.11)$$

Utilizando las ecuaciones anteriores (2.2-2.11), la atenuación constante debido a las pérdidas óhmicas pueden calcularse como [17]:

$$\alpha_c^{c\omega} = 4.88 * 10^{-4} R_s \varepsilon_{re} Z_{0cp} \frac{P'}{\pi G} \left(1 + \frac{W}{G}\right) \left\{ \frac{\frac{1.25}{\pi} \ln \frac{4\pi W}{t} + 1 + \frac{1.25t}{\pi W}}{\left[2 + \frac{W}{G} - \frac{1.25t}{\pi G} \left(1 + \ln \frac{4\pi W}{t}\right)\right]^2} \right\} \quad (2.12)$$

Donde:

$$P' = \left(\frac{k}{k'}\right)^2 p \quad (2.13)$$

$$P = \begin{cases} \frac{k}{\left(1 - \sqrt{1 - k^2}\right) \left(1 - k^2\right)^{3/4}} & \text{para } 0 \leq k \leq 0.707 \\ \frac{1}{(1 - k)\sqrt{k}} \left(\frac{k}{k'}\right)^2 & \text{para } 0.707 \leq k \leq 1 \end{cases} \quad (2.14)$$

y

$$R_s = \sqrt{\rho \pi f \mu} \quad (2.15)$$

La atenuación es constante debido a las pérdidas dieléctricas y se determina como [24]:

$$\alpha_d = 27.3 \frac{\varepsilon_r}{\sqrt{\varepsilon_{re}}} * \frac{\varepsilon_{re} - 1}{\varepsilon_r + 1} * \frac{\tan \delta}{\lambda_0} \text{ dB/unidad de longitud} \quad (2.16)$$

Donde $\tan(\delta)$ es la tangente de pérdida del dieléctrico y la atenuación total puede escribirse como:

$$\alpha_{CPW} = \alpha_c + \alpha_d \quad (2.17)$$

Por lo tanto, la constante de fase puede ser calculada como [20]:

$$\beta_{CPW} = \frac{2\pi f}{v_{cp}} \quad (2.18)$$

A continuación, estas expresiones se utilizarán para introducir el CPW interdigital capacitor cargado que luego se utiliza para diseñar una antena de orden cero RFID.

2.4 Capacitor interdigital cargado

Una línea de transmisión con un capacitor interdigital cargado proporciona una resonancia en serie [18]. El modelo de línea de transmisión equivalente de una línea de transmisión de un capacitor interdigital cargado se muestra en la figura 2.7, y consta de dos líneas de transmisión simétricas interconectadas con una capacitancia en serie. La línea de transmisión de acogida se ha mostrado igualmente dividido en dos partes. Dado que el

tamaño de la celda unitaria es mucho menor que la longitud de onda guiada, la línea de transmisión puede ser modelada con un circuito equivalente con una inductancia en serie y una capacitancia en derivación.

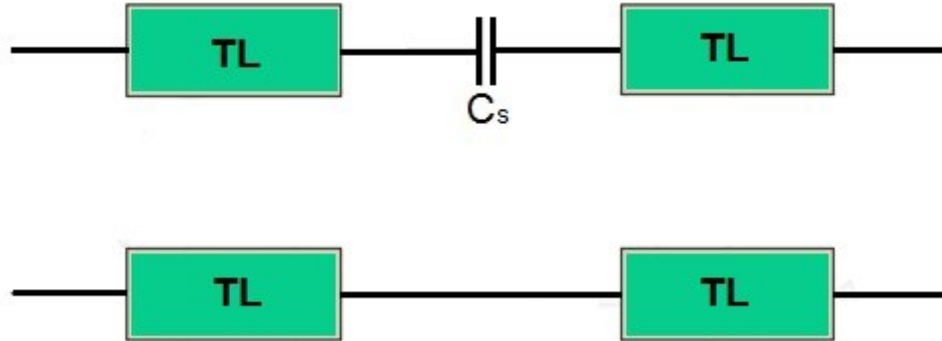


Figura 2.7. Circuito equivalente del capacitor interdigital cargado.

La geometría de la celda unidad basada en un capacitor interdigital se muestra en la figura 2.8. La capacitancia entre el capacitor interdigital y plano de tierra bilateral es bastante pequeña en comparación con la capacitancia en serie del capacitor interdigital por lo que se puede despreciar. Esta celda unidad puede ser repetida periódicamente para diseñar la antena ZOR.

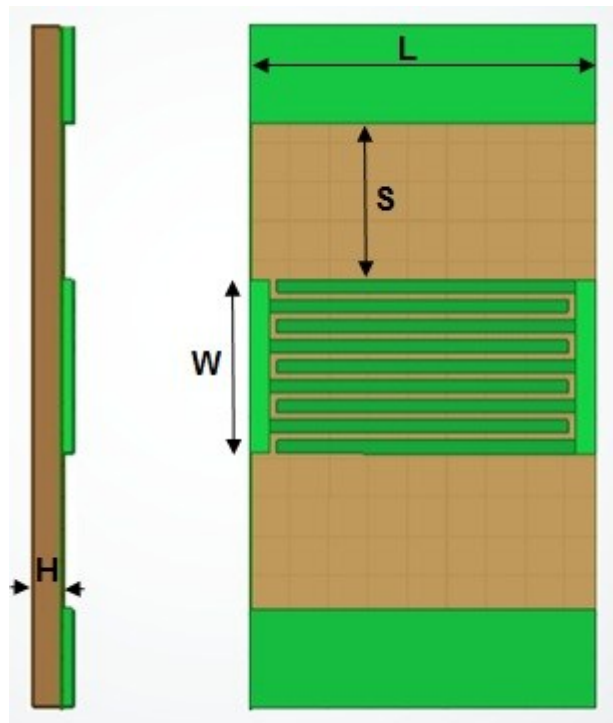


Figura 2.8. Celda unidad de un capacitor interdigital cargado.

La celda unidad se debe repetir periódicamente y debe ser simétrica con respecto al puerto de la antena, que se parecerá a la LT que se mostró en la figura. 2.8. Por lo tanto, la constante de propagación γ (donde $\gamma = \alpha + j\beta$) y la impedancia característica Z_B (también conocida como impedancia de bloque) se pueden expresar en términos de una matriz ABCD como [19]:

$$\cosh(\gamma L) = A \quad (2.19)$$

y

$$Z_B = \frac{BZ_0}{\sqrt{A^2 - 1}} \quad (2.20)$$

Donde L es la longitud de la celda unitaria y Z_0 es la impedancia característica de la CPW. La constante de propagación de la LT es $\gamma_{CPW} = \alpha_{CPW} + j\beta_{CPW}$ donde α_{CPW} y β_{CPW} pueden calcularse a partir de las ecuaciones 2.17 y 2.18, respectivamente.

A continuación, la matriz ABCD del circuito mostrado en la Figura 2.7 se puede determinar cómo [19]:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_{CPW} = \begin{bmatrix} \cosh \frac{\gamma_{CPW} L}{2} & Z_0 \sinh \frac{\gamma_{CPW} L}{2} \\ \gamma_0 \sinh \frac{\gamma_{CPW} L}{2} & \cosh \frac{\gamma_{CPW} L}{2} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

y

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_{capacitor_interdigital} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{j\omega c} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Donde L/2 representa la mitad de la longitud de CPW. La matriz ABCD de la celda unidad entera se puede calcular a partir de las ecuaciones 2.21 y 2.22 como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} A & C \\ B & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_{CPW} * \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_{capacitor_interdigital} * \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_{CPW} \quad (2.23)$$

A partir de la ecuación 2.23, el parámetro A se puede calcular y la ecuación 2.19 se puede escribir como:

$$\cosh \alpha L \cos \beta L + j \sinh \alpha L \sin \beta L = M + jN + \left(\frac{1}{j2Z_0\omega C} \right) (O + jP) \quad (2.24)$$

Donde:

$$M = \cosh \alpha_{CPW} L \cos \beta_{CPW} L \quad (2.25)$$

$$N = \sinh \alpha_{CPW} L \sin \beta_{CPW} L \quad (2.26)$$

$$O = \sinh \alpha_{CPW} L \cos \beta_{CPW} L \quad (2.27)$$

$$P = \cosh \alpha_{CPW} L \sin \beta_{CPW} L \quad (2.28)$$

En la ecuación 2.24 α representa la constante de atenuación y β representa la constante de fase de la onda de propagación de Bloch en la celda unidad, mientras α_{CPW} and β_{CPW} son constantes de atenuación y fase respectivamente, de la CPW anfitrión. A partir de la ecuación 2.24, las partes real e imaginaria se pueden separar quedando:

$$\cosh \alpha L \cos \beta L = \cosh \alpha_{CPW} L \cos \beta_{CPW} L + \frac{\cosh \alpha_{CPW} L \sin \beta_{CPW} L}{2Z_0\omega C} \quad (2.29)$$

$$\sinh \alpha L \sin \beta L = \sinh \alpha_{CPW} L \sin \beta_{CPW} L - \frac{\sinh \alpha_{CPW} L \cos \beta_{CPW} L}{2Z_0\omega C} \quad (2.30)$$

Las incógnitas en las ecuaciones 2.29 y 2.30 son la constante de atenuación (α) y la constante de fase (β) de la onda de propagación de Bloch. Realizando el desarrollo para determinar α y β queda:

$$\alpha = \frac{1}{L} \cosh^{-1} \left(\frac{\sqrt{Q^2 + (R+1)^2} + \sqrt{Q^2 + (R-1)^2}}{2} \right) \quad (2.31)$$

y

$$\beta = \frac{1}{L} \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{Q^2 + (R+1)^2} - \sqrt{Q^2 + (R-1)^2}}{2} \right) \quad (2.32)$$

donde Q y R son los lados derecho de las ecuaciones 2.29 y 2.30, respectivamente. La idea fundamental en el diseño de una antena ZOR es determinar la frecuencia a la que la constante de fase, de la onda de propagación de Bloch, es igual a cero. Debido a que la constante de fase es inversamente proporcional a la longitud de onda, a la frecuencia en que la constante de fase es igual a cero, la longitud de onda va a ser igual a infinito. A esta frecuencia, la antena se ve eléctricamente infinitamente larga.

2.5 Diseño de una etiqueta de RFID pasiva

Esta tesis describe los parámetros que son importantes para el diseño de antenas de RFID pasiva. Las antenas utilizadas en aplicaciones de etiquetas RFID son definidas por la necesidad de mantener un tamaño pequeño y que sean de un bajo costo.

Las ecuaciones utilizadas en este proyecto de investigación son exactas para algunos escenarios y aproximaciones para otros, pero en todos los casos las ecuaciones nos permiten la aproximación de la antena o entender un concepto como el tamaño relativo de una antena.

2.5.1 Requisitos de la antena

En comparación a las típicas antenas utilizadas para transmitir y recibir, las funciones para los lectores de RFID y las antenas utilizadas en la etiqueta RFID requieren diferentes características.

Algunos de los parámetros más importantes de la antena contenida en las etiquetas RFID son:

- ✓ Haz o campo de visión (FOV).
- ✓ Directividad.
- ✓ Ganancia.
- ✓ Eficiencia.
- ✓ Tipos de polarización.
- ✓ Ancho de banda.

❖ Haz o campo de visión

Los *tags* RFID pueden ser leídos sin contacto y/o fuera del campo de visión de los lectores, y pueden ser actualizados con nueva información a medida que estos pasan por diferentes fases (leer/grabar, etc.). Por otro lado los lectores RFID pueden diferenciar y leer múltiples elementos simultáneamente.

La posibilidad de leer una etiqueta RFID en una amplia gama de ángulos es un aspecto y un requisito muy importante. La forma de diseño en sentido amplio es limitar el tamaño de la antena, es decir, fabricarla de tal manera que su directividad sea baja.

Al mantener las dimensiones físicas de la antena en virtud de la mitad de la longitud de onda las características del haz se mantendrán.

Este concepto de vincular el campo de visión (FOV) de las dimensiones físicas de una abertura radiante se muestra en las ecuaciones siguientes:

$$3_{dB} BW = 0.886 \frac{\lambda}{L_x} \quad (2.33)$$

En el plano XZ, donde L_x es la longitud en la dirección X.

$$3_{dB} BW = 0.886 \frac{\lambda}{L_y} \quad (2.34)$$

En el plano YZ, donde L_y es la longitud en la dirección Y.

Un radiador isotrópico es la antena ideal para la mayoría de aplicaciones de las etiquetas RFID, pero lamentablemente esto es físicamente irrealizable, la aproximación más cercana se encuentra en los diseños de la antena dipolo.

❖ Directividad

La directividad (D) de una antena es una medida de la concentración de la potencia radiada en una dirección particular. Se puede entender también como la habilidad de la antena para direccionar la energía radiada en una dirección específica. Es usualmente una relación de intensidad de radiación en una dirección particular en comparación a la intensidad promedio isotrópica.

$$D = \frac{\text{Intensidad de radiación máxima}}{\text{Intensidad de radiación promedio}} \quad (2.35)$$

Donde, la intensidad de radiación máxima es la potencia máxima en una dirección específica y la intensidad de radiación promedio es la energía total radiada por la antena.

❖ Ganancia

La ganancia de una antena es la relación entre la potencia que entra en una antena y la potencia que sale de esta. Esta ganancia es comúnmente referida en dB, y se refiere a la comparación de cuanta energía sale de la antena en cuestión, comparada con la que saldría de una antena isotrópica. Una antena isotrópica es aquella que cuenta con un patrón de radiación esférico perfecto y una ganancia lineal unitaria.

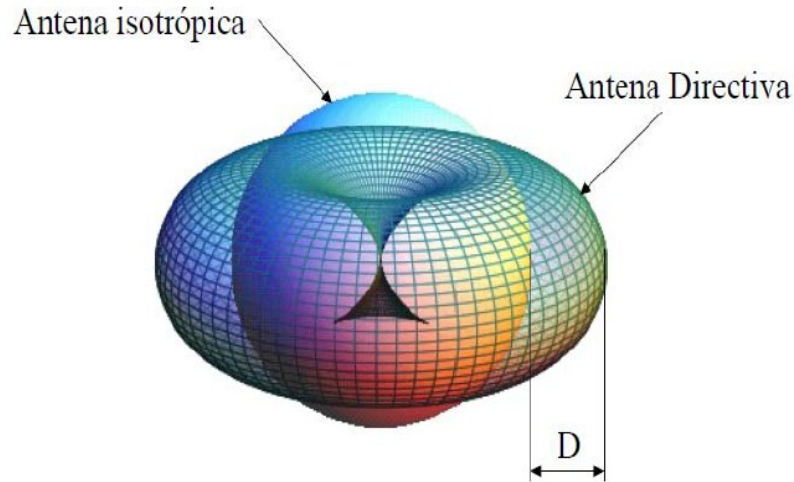


Figura 2.10. Ganancia de una antena. (Fuente: [19])

Podemos calcular la ganancia de la antena que se utiliza en una etiqueta RFID con la siguiente ecuación:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (2.36)$$

Donde A_e es el área efectiva y se determina como se muestra a continuación.

$$A_e = \eta A \quad (2.37)$$

Donde A es el área física.

La ganancia de una antena tiene en cuenta las pérdidas asociadas con un diseño específico, tales como la pérdida de discordancia, las pérdidas de resistencia, las pérdidas de polarización, etc.

La ganancia de antena es igual a la directividad después de contabilizar las pérdidas de la antena. Con el aumento del área física de la antena aumenta la ganancia. La ganancia (G) de una antena se expresa en dB al ser una unidad de potencia.

❖ Eficiencia

La eficiencia es la relación entre la potencia radiada y la potencia entregada a la antena. También se puede definir como la relación entre la ganancia y la directividad.

$$\eta = \frac{G}{D} \quad (2.38)$$

❖ Polarización

En el capítulo anterior se comentó brevemente sobre la polarización de las antenas RFID, ahora se pretende abordar un poco sobre este tema.

La polarización de una antena se define por la orientación del campo eléctrico de la onda electromagnética radiada.

En las antenas de la tecnología RFID se utilizan tres tipos de polarización: la polarización lineal que se divide en la polarización horizontal y vertical, la polarización circular y la polarización cruzada.

Si el campo eléctrico es horizontal, la antena tiene polarización horizontal; si es vertical, tendrá polarización vertical. En general, la polarización coincide con la posición del hilo conductor de la antena. Si ésta tiene el conductor en posición horizontal, la antena tiene polarización horizontal; si está vertical, tendrá polarización vertical.

La polarización circular se produce cuando la potencia de transmisión se divide en dos componentes que son lineales perpendiculares entre sí, es decir, un componente vertical y horizontal.

Para una óptima eficiencia (lectura a distancia) en un sistema RFID, la polarización de la antena de la etiqueta debe coincidir con la polarización de la antena del lector. Idealmente, deben ser polarizados circularmente la antena del lector de las etiquetas y la antena de las etiquetas que se utilizan para eliminar el requisito de mantener una etiqueta en una orientación horizontal o vertical.

Prácticamente, polarizar circularmente las antenas es de difícil diseño y son más grandes que las antenas de polarización lineal, pero nos permite una orientación aleatoria de los *tags*. El único inconveniente es que el rendimiento de lectura / escritura es reducido notablemente.

Una antena polarizada linealmente transmite toda la potencia del transmisor en un estado de polarización, ya sea polarización vertical u horizontal.

Cuando la antena es polarizada circularmente transmite toda la potencia del transmisor en una onda polarizada circularmente, que está compuesto de dos componentes linealmente polarizadas, y la rotación en un plano transversal a la dirección de viaje. Lo que esto significa es que la onda polarizada circularmente está girando en sentido horario o en sentido anti horario que es la forma en que viaja la onda. Esta onda se desplaza más allá

de una antena polarizada linealmente, en cualquier instante de tiempo sólo que con la mitad de la energía.

La polarización cruzada tiene lugar cuando un extremo del enlace tiene polarización diferente al otro extremo. La polarización cruzada implica una pérdida de señal que puede alcanzar los 20 dB.

Lo importante de la polarización cruzada es que nos permitirá medir una etiqueta que se ha girado 90° de la orientación a una pequeña distancia. Un inconveniente es que la energía contenida en el campo de la polarización cruzada es la energía que no está disponible para su uso en la polarización, esto afecta principalmente a la lectura a distancia.

❖ Ancho de banda

El ancho de banda (AB) de una antena se define como el intervalo de frecuencias, en el que un parámetro de una antena determinada no sobrepasa unos límites prefijados o como el intervalo de frecuencias en el cual una antena puede operar satisfactoriamente, donde los límites que conforman este intervalo no deben sobrepasarse.

El valor que define los extremos del ancho de banda depende muchas veces del tipo de antena que se esté analizando y de la aplicación de la misma en un sistema de radio. Esta definición de ancho de banda resulta bastante inexacta, pues depende de que característica de trabajo se considera y, además, porque no se ha definido un criterio exacto para su determinación. Por ello, al referirnos al ancho de banda de una antena, debemos especificar que parámetro se ha tenido en cuenta y cuál es el criterio utilizado para establecer sus límites.

El ancho de banda se puede medir en porcentaje, para un rango de frecuencias que en la mayoría de las aplicaciones ROE es menor que 2 ó P_{ret} es menor que -9.5dB.

$$AB = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_c} \times 100\% \quad (2.39)$$

Donde:

f_{max} : es la frecuencia máxima de la banda.

f_{min} : es la frecuencia mínima de la banda.

f_c : es la frecuencia central de la banda.

CAPITULO 3 . DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ANTENA TAG RFID PASIVA EN UHF

En este capítulo se muestra el diseño y simulación de una antena RFID pasiva de resonancia de orden cero (ZOR), con capacitores interdigitales cargados en guías de ondas coplanares (CPW) en UHF, que opera a la frecuencia de 915 MHz. Finalmente se muestran todos los resultados correspondientes a la simulación de la antena diseñada utilizando el software HFSS v15, donde la característica crítica que se analiza en el diseño de la antena es el acoplamiento antena-CI para poder conseguir la máxima transferencia de energía. Esta característica se cuantifica con el parámetro S_{11} el cual indica que tan eficiente es la antena como radiador, con un valor óptimo de -10dB de pérdida de retorno.

3.1 Diseño de la antena

El diseño de la antena ZOR RFID que se propone en este trabajo se muestra en la figura 3.1. El puerto de la antena se encuentra en el centro de la antena, con los capacitores interdigitales en serie a cada lado del mismo. En la resonancia, los capacitores interdigitales están apoyando una onda que se propaga a lo largo de la antena. Debido a que la impedancia de entrada del ASIC también es capacitiva, el ASIC apoya la propagación de la onda a lo largo de la antena de una manera similar a los capacitores interdigitales [18]. Durante este proceso, el ASIC recibe la potencia necesaria para realizar las tareas deseadas y se comunica mientras que apoya al mismo tiempo a la onda que se propaga en la antena.

La antena que se muestra en la figura 3.1 se simuló en el software HFSS v15 con los parámetros de diseño que se muestran en la tabla 3.1. Se utilizó como sustrato A Rogers TMM4 con una permitividad de 4.5. La capacitancia aproximada para una antena ZOR a 915 MHz se extrajo de [20], para ser $C_{\text{extracted}} = 2.4$ pF.

Se calculó la constante de atenuación de la CPW usando la ecuación 2.17 y la tangente de pérdida se tomó como $\tan \delta = 0.002$. La conductividad se define como $\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m con un espesor del conductor de 35 micras.

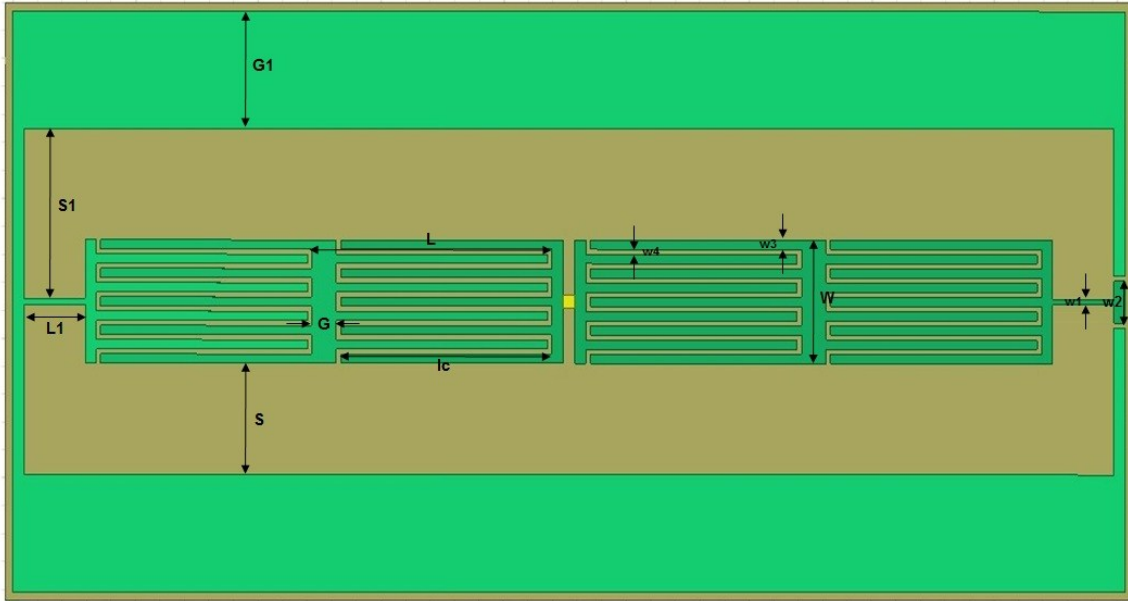


Figura 3.1. Diseño de la antena RFID propuesta.

Tabla 3.1. Parámetros de diseño de la antena propuesta

| Parámetro | Valor (mm) | Parámetro | Valor (mm) |
|-----------|------------|-----------|------------|
| W | 8.82 | lc | 15.26 |
| S | 7.98 | L | 17.72 |
| G | 2.4 | G1 | 6.4 |
| w1 | 0.4 | L1 | 4.8 |
| w2 | 3 | S1 | 12.17 |
| w3 | 0.66 | lt | 87.04 |
| w4 | 0.36 | at | 39.58 |

Donde:

lt: longitud total de la antena.

at: ancho total de la antena.

A partir del valor de capacitancia y de la ecuación 3.1 se buscaron el resto de los parámetros necesarios para el diseño de un capacitor interdigital. En la figura 3.2 se muestra un capacitor interdigital a partir del cual fueron realizados los cálculos que a continuación se muestran. La más frecuente relación para esta estructura es atribuida a Alley.

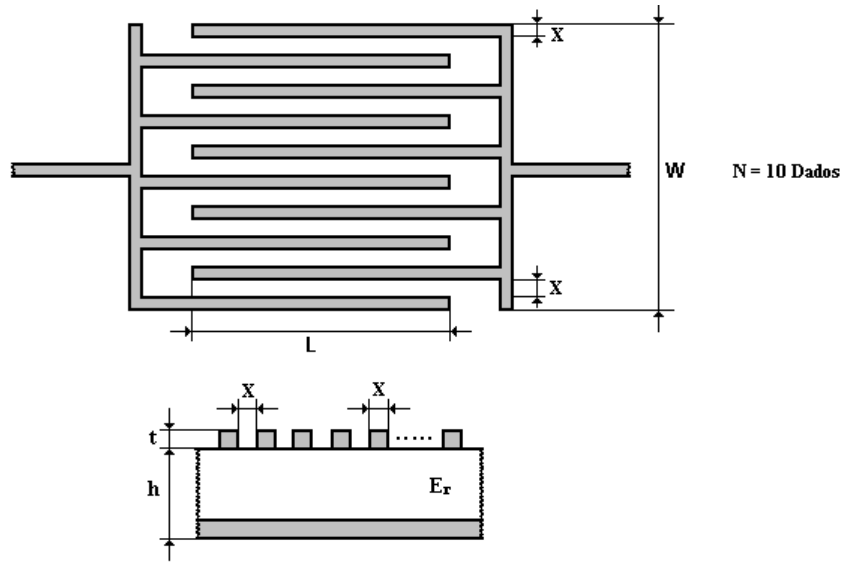


Figura 3.2. Capacitor interdigital. (Fuente: [20])

$$C = \frac{E_r + 1}{W} \{ [(N-3)A_1 + A_2] \left(\frac{\text{pF}}{\text{pulg}} \right) \} \text{ (pulgadas de ancho } W) \quad (3.1)$$

donde

$$A_1 = \left(0.3349057 - 0.15287116 \left(\frac{t}{x} \right) \right)^2 \left(\frac{\text{pF}}{\text{pulg}} \right) \quad (3.2)$$

$$A_2 = \left(0.50133101 - 0.22820444 \left(\frac{t}{x} \right) \right)^2 \left(\frac{\text{pF}}{\text{pulg}} \right) \quad (3.3)$$

La ecuación 3.1 es válida para:

$$h > \frac{W}{N} \quad (3.4)$$

3.2 Estructura de la antena diseñada

Como se muestra en la figura 3.1 la antena se compone de cuatro capacitores interdigitales en serie, donde el capacitor interdigital tiene un diseño similar a la imagen de la figura 2.8. El chip que se utilizó fue el Texas Instruments Gen 2 y el mismo debe ser fijado en el puerto de la antena. El Texas Instruments Gen 2 tiene una impedancia de entrada de $Z_{in} = 13.5 - j60\Omega$ a 915 MHz. La antena se ha diseñado sobre un sustrato Rogers TMM4 con $\epsilon_r = 4.5$, $\tan \delta = 0.002$ y un espesor de sustrato de $H = 1.5$ mm.

Una banda central más amplia se utilizó para obtener la capacitancia en serie requerida como se mostró en la figura 3.1 y la brecha entre el conductor central y los planos de referencia se hizo tan grande como fuera posible para que la capacitancia en derivación parasitaria pudiera hacerse tan pequeña como fuera posible. Esto aseguró una capacitancia en serie dominante creada por la capacitancia interdigital y la impedancia de entrada del tag RFID pasivo de UHF del ASIC conectado al puerto de la antena.

3.3 Resultado de la simulación

La antena RFID de resonancia de orden cero se simuló en el software de modelación Ansoft HFSS v15, para un rango de frecuencias entre los 800 MHz a 1.1 GHz. La resistencia y reactancia de entrada, la ganancia total de la antena, la directividad y el coeficiente de reflexión simulados se muestran en las figuras 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6, respectivamente.

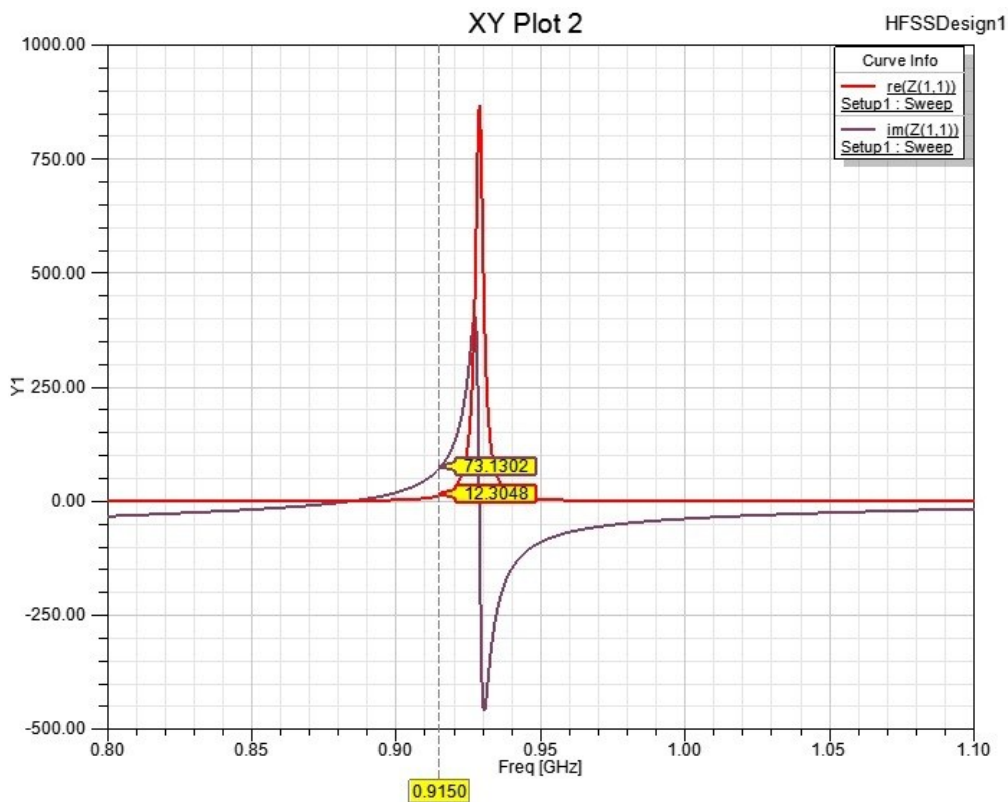


Figura 3.3. Parte real e imaginaria de la impedancia de entrada de la antena propuesta.

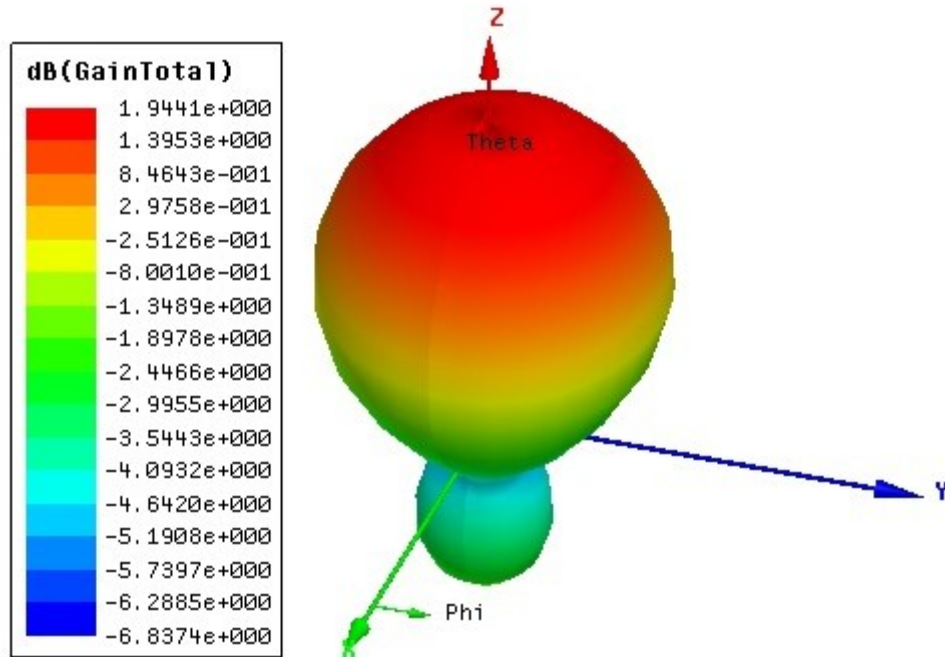


Figura 3.4. Diagrama de Ganancia total de la antena propuesta.

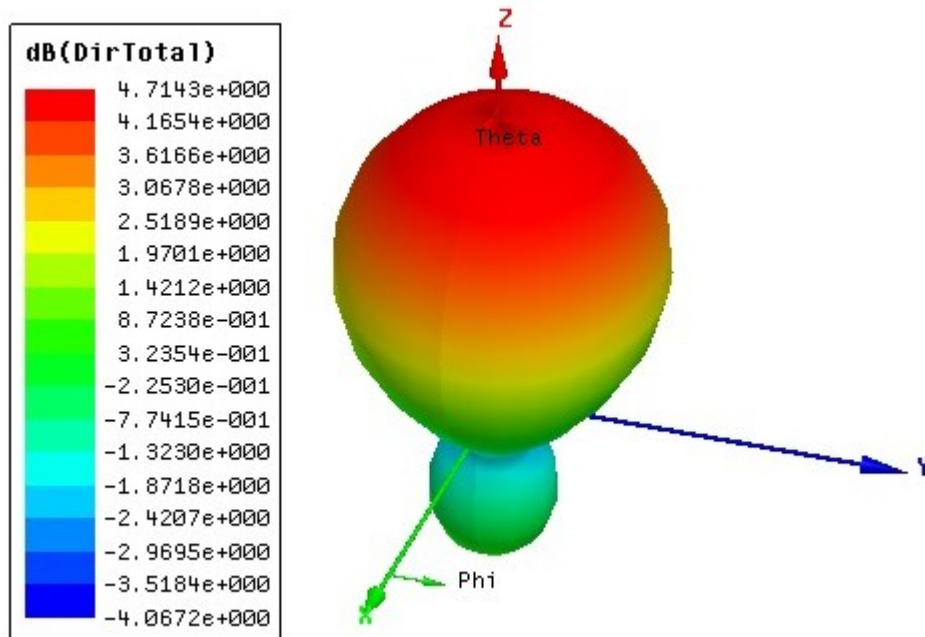


Figura 3.5. Diagrama de directividad de la antena propuesta.

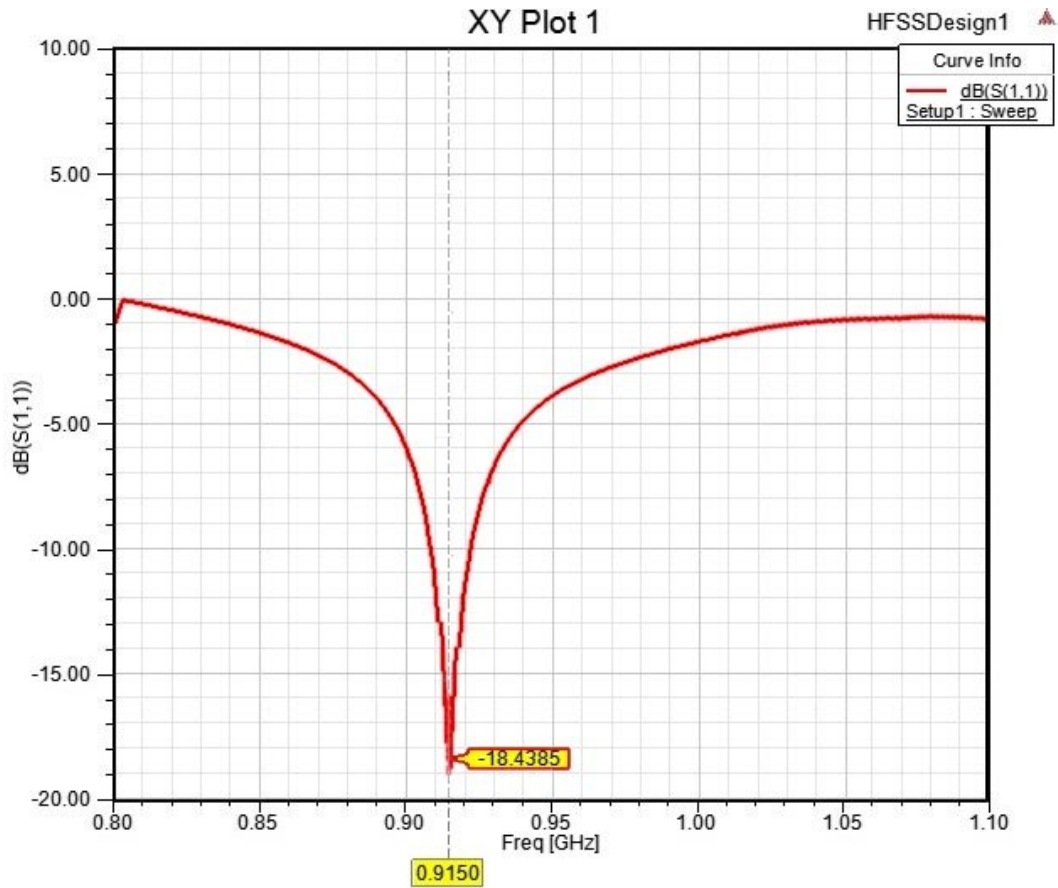


Figura 3.6. Diagrama de coeficiente de reflexión (Parámetro S_{11}).

En la figura 3.3 anterior, se puede observar que los valores de parte real e imaginaria de la impedancia son aceptables, ya que la impedancia resultante $Z_{in} = 12.3048 + j73.1302$ se aproxima a la impedancia de entrada del chip seleccionado anteriormente, permitiendo un buen acople entre la antena propuesta y el circuito integrado.

Por otra parte en las figuras 3.4 y 3.5, se muestran respectivamente los diagramas de radiación en tres dimensiones, donde se observa que la antena tiene un lóbulo principal en el cual se logra la mayor ganancia que puede lograr la antena, aproximadamente unos 1.94 dB. En el diagrama de directividad se observa que la antena diseñada tiene un comportamiento direccional, o sea, tiene la mayor concentración de radiación para un solo plano.

En la figura 3.6, se observa que la antena resuena a la frecuencia para la cual se diseñó, 915 MHz, para la cual se obtiene una pérdida de retorno de -18.4 dB aproximadamente, lo cual implica que en esta frecuencia la antena obtiene su óptimo desempeño.

Teniendo en cuenta las impedancias de la antena y del circuito integrado, podemos pasar a calcular el coeficiente de transferencia de energía a la frecuencia de 915 MHz, mediante la ecuación (1.2), obteniendo como resultado 0.9978.

Con el coeficiente de transferencia de energía de 0.9978, la ganancia de la antena de 1.94 dB, y teniendo en cuenta que la potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE) que emite el lector, especificada en las normas locales o nacionales, por ejemplo en México se tiene la NOM-121 de 4W o 36 dBm de potencia PIRE para la banda de frecuencia donde operan los sistemas RFID pasivos (902-928 MHz). Por lo que de acuerdo con la ecuación de Friis (1.1), la distancia de lectura máxima de la etiqueta de acuerdo a la ecuación (1.4) es de 19.6 m , que cumple con el rendimiento de las etiquetas RFID UHF pasivas similares, que se encuentran disponibles en el mercado hoy en día.

3.4 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se diseñó una antena de resonancia de orden cero (ZOR) con capacitores interdigitales cargados en guías de ondas coplanares (CPW), con un ancho de banda de 14 MHz, una ganancia de 1.94 dB, resonando a la frecuencia de 915 MHz para la cual fue diseñada, con un coeficiente de transferencia de energía de 0.9978, obteniéndose un rango máximo de lectura de 19.6 m.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

A lo largo de este trabajo se comprendió la importancia que tienen las antenas de etiquetas de RFID en el desempeño global del sistema. Las características principales de estas antenas ejercen un efecto directo en el comportamiento de la etiqueta los cuales a su vez tienen una relación directa con la distancia de lectura máxima que alcanza el sistema de RFID. Las antenas permiten optimizar la respuesta del sistema en general al no estar limitados sus parámetros por las normas internacionales vigentes para esta tecnología y las características de los CI establecidas por los fabricantes.

Se realizó un resumen de las características de la propagación zurda, guías de ondas coplanar, así como del capacitor interdigital. Se diseñó y simuló una antena de resonancia de orden cero (ZOR) RFID para etiquetas RFID UHF pasivas para que trabajara a la frecuencia de 915 MHz. El uso de capacitores interdigitales a lo largo de la longitud de la antena diseñada apoya la propagación de ondas electromagnéticas. La impedancia de entrada capacitiva del circuito integrado de RFID pasivo que se anexa al puerto de la antena es compatible con la propagación de ondas de manera similar a como ocurre en los capacitores interdigitales. Se logró un buen acople de impedancia entre la antena y el circuito integrado. El rango máximo de lectura obtenido teóricamente de la antena cumple con el rendimiento de la etiquetas RFID UHF pasivas disponibles en el mercado hoy en día.

Recomendaciones

1. Reducir el tamaño máximo de la antena de resonancia de orden cero (ZOR) RFID.
2. Elegir sustratos más flexibles para el diseño de la antena, tales como: sustratos Kapton.
3. Desarrollar una antena multibanda a partir del diseño de la antena obtenida.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Ahson and M. Ilyas, *RFID Handbook: Applications, Technology, Security, and Privacy*. New York: CRC Press, 2008.
- [2] K. V. S. Rao, P. V. Nikitin, and S. F. Lam, "Antenna Design for UHF RFID Tags: A review and a Practical Application," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no. 12, pp. 3870-3876, Dec. 2005.
- [3] A. Cardama-Aznar, L. Jofre-Roca, J. M. Rius-Casals, J. Romeu-Robert, and S. Blanch-Boris, *Antenas*. Barcelona: Edicions UPC, 1998, pp. 19-24, 258-260.
- [4] K. Finkenzeller, *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification*. New York: Wiley, 2003.
- [5] J. Wilas, K. Jirasereeamornkul, and P. Kumhom, "Power Harvest Design for Semi-Passive UHF RFID Tag Using a Tunable Impedance Transformation," *9th International Symposium on Communications and Information Tech.*, pp. 1441-1445, Sep. 2009.
- [6] F. J. Herraiz-Martínez, E. Ugarte-Muñoz, V. González-Posadas, L.E. García-Muñoz, and D. Segovia-Vargas, "Self-Diplexed Patch Antennas Based on Metamaterials for Active RFID Systems," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 57, no. 5, pp. 1330-1340, May. 2009.
- [7] P. V. Nikitin, and K. V. S. Rao, "Theory and Measurement of Backscattering from RFID tags," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 48, no. 6, pp. 212-218, Dec. 2006.
- [8] P. V. Nikitin, K. V. S. Rao, S. F. Lam, V. Pillai, R. Martínez, and H. Heinrich, "Power Reflection Coefficient Analysis for Complex Impedances in RFID Tag Design," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 53, no. 9, pp. 2721-2725, Sep. 2005.
- [9] K. V. S. Rao, P. V. Nikitin, and S. F. Lam, "Antenna Design for UHF RFID Tags: A review and a Practical Application," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no. 12, pp. 3870-3876, Dec. 2005.
- [10] F. E. Solares Savala: "Desarrollo de antenas para la tecnología de RFID pasiva en la banda de UHF (902-928 MHz)". Tesis presentadas para obtener el grado de Maestro en Ciencias de Ingeniería Electrónica. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Profesional "Adolfo López Mateos". México, 201.

- [11] EPC Global “EPC Radio Frequency Identity Protocols Class-1 Generation-2 UHF RFID Protocol for Communications at 860 MHz-960 MHz Version 1.2.0 ”. I 2008.
- [12] A. Rida, R. Vyas, T. Wu, R. Li, and M. M. Tentzeris, “Development and Implementation of Novel UHF Paper-Based RFID Designs for Anti-counterfeiting and Security Applications”, *IEEE Int. Workshop on Anti-counterfeiting, Security, Identification*, pp. 52-56, Apr. 2007.
- [13] V. Veselago, “The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ .”, *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 10, no. 4, pp. 509–514, 1968.
- [14] S. Pereira Sánchez: “Análisis y Diseño de Antena Leaky-Wave CRLH y de Superficie Selectiva en Frecuencia para el control de los campos radiados”. Proyecto Fin de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación Universidad Politécnica de Cartagena. España, 2013.
- [15] Wen C.P. Coplanar Waveguide: A Surface Strip Transmission Line Suitable for Non-Reciprocal Gyromagnetic Device Application. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques* December 1969; 17(12) 1087-1090.
- [16] Collin R. E. *Foundations for Microwave Engineering* 2nd edition, John Wiley and Sons, Inc. Hoboken, New Jersey 2001.
- [17] Gupta KC., Garg R., Bahl I.J. *Microstrip Lines and Slotlines*, Artech House, Massachusetts 1979.
- [18] Lai CP., Chiu SC., Li HJ., Chen SY. Zeroth Order Resonator Antennas Using Inductor-Loaded and Capacitor-Loaded CPWs. *IEEE Transaction on Antennas and Propagations* September 2011; 59(9) 3448-3453.
- [19] Pozar D. M. *Microwave Engineering* 3rd edition, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey 2005.
- [20] Caloz C., Itoh T. *Electromagnetic Metamaterials*. Piscataway-Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2005.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

RFID: *Radio Frequency Identification*, Identificación por radiofrecuencia.

HFSS: *High frequency structure simulator*, Simulador de estructuras de altas frecuencias.

Reader: Lector.

Tag: Tarjeta.

ID: Identificador.

RF: Radio Frequency, radiofrecuencia.

IC: Integrated Circuit, Circuito Integrado o chip.

EPC global: Código electrónico de producto.

CW: Onda continua, Continuous Wave.

CPW: Guía de onda coplanar.

UHF: Ultra alta frecuencia.

ASIC: Circuito integrado de aplicación específica.

LF: Baja frecuencia.

LH: *Left-handed*, materiales zurdos.

RH: *Right-handed*, materiales diestros.

SRR: *Split-ring Resonator*, Resonador de anillos abiertos.

CPW: *coplanar waveguide*, guía de ondas coplanar.

ZOR: *Zeroth Order Resonance*, Resonador de orden cero.

LT: Línea de transmisión.