



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

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

AUTORA:

Santos Estupiñán, Paola Andrea

**Trabajo de titulación previo a la obtención del grado de
Magister en Telecomunicaciones**

TUTOR:

MSc. Manuel Romero Paz

Guayaquil, a los 30 días del mes Noviembre año 2016



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por Santos Estupiñán, Paola Andrea como requerimiento parcial para la obtención del Título de Magíster en Telecomunicaciones.

TUTOR

MSc. Manuel Romero Paz

DIRECTOR DEL PROGRAMA

MSc. Manuel Romero Paz

Guayaquil, a los 30 días del mes Noviembre año 2016



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

YO, SANTOS ESTUPIÑÁN, PAOLA ANDREA

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación “**Diseño de una antena tag RFID pasiva de orden cero (ZOR) en UHF con metamateriales.**”, previo a la obtención del Título de **Magíster en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 30 días del mes Noviembre año 2016

LA AUTORA

Santos Estupiñán, Paola Andrea



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

AUTORIZACIÓN

YO, SANTOS ESTUPIÑÁN, PAOLA ANDREA

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación**, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, “**Diseño de una antena tag RFID pasiva de orden cero (ZOR) en UHF con metamateriales.**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 30 días del mes Noviembre año 2016

LA AUTORA

Santos Estupiñán, Paola Andrea

REPORTE URKUND

The screenshot displays the URKUND report interface. At the top, there is a navigation bar with the URKUND logo and a search bar. Below this, the document details are shown:

- Documento:** Trabajo de titulación: Paola Santos. Final.docx (D23-477991)
- Presentado:** 2016-11-19 11:30 (-05:00)
- Presentado por:** orlandophilco_7@hotmail.com
- Recibido:** orlando.philco.ucsg@analysis.urkund.com
- Mensaje:** Reenv: Tesis Paola Santos corregida [Mostrar el mensaje completo](#)

Below the document details, there is a section for sources:

4% de esta aprox. 34 páginas de documentos largos se componen de texto presente en 1 fuentes.

Lista de fuentes	Bloques
91%	suele ser muy pequeño y requiere transmitir la suficiente potencia como para que ...
86%	El problema de estos es que los sistemas propuestos trabajan con un armónico pa...
100%	Como ventajas cabe decir que un sistema full-duplex permite transmitir una mayo...
91%	El reader transmite una señal modulada, a través del enlace radio, que es recibida ...
100%	sea capaz de modular y demodular la señal será necesario que esté provisto de un...
100%	se alimentará el chip mediante una batería adicional. El envío de información
80%	Backscatter o reflexión: La frecuencia de la onda reflejada por el tag es la misma q...
100%	transmisor del
100%	Misma frecuencia para ambos enlaces. Uso de subarmónicos (1/n veces) y la gener...
98%	pasivo (compuesto por el chip específico y la antena, ambos con impedancia com...

At the bottom of the interface, there is a summary section:

98% Fuente externa: <http://docplayer.es/14565791-Sistemas-rfid-en-uhf-y-microondas.html>

98% 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.

Reporte Urkund Tesis “Diseño de una antena tag RFID pasiva de orden cero (ZOR) en UHF con metamateriales” de la Ingeniera, Paola Santos. Al 4% de coincidencias.

Atentamente.

Msc Orlando Philco A.

AGRADECIMIENTO

Le agradezco principalmente a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi vida, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

A mis padres por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, y por haber creído en mí y haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida. Sobre todo por ser mi ejemplo de vida a seguir.

A mis hermanas por ser parte fundamental de mi vida y por estar presente en todo momento con las palabras adecuadas para guiarme y levantarme el ánimo.

A Javier, por ser una parte muy importante de mi vida, por haberme sido mi compañero y apoyo en los buenos y en malos momentos, sobre todo por su paciencia y amor incondicional.

A mi familia y amigos porque sin su apoyo incondicional nada de esto sería posible.

Gracias a todos mis profesores por el apoyo brindado, por su tiempo, por sus sabios consejos y sus conocimientos impartidos. Su ardua labor permite formar mejores profesionales con miras a lograr mejores días para el país y el mundo.

DEDICATORIA

A Dios, Jesús y la Virgen María por ser luz y guía en todas las etapas de mi vida.

A mi padre que desde el cielo es mi ángel guardián y mi mayor inspiración para triunfar.

A mi madre de quién recibo la fortaleza para continuar cuando me siento vencida y es mi ejemplo a seguir.

A mis hermanas, mi novio, familiares y amigos por ser partícipes de buenos y malos momentos que han hecho de mí una mejor persona, lo cual me permite alcanzar hoy esta nueva meta.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

MSc. Manuel Romero Paz

TUTOR

f. _____

MSc. Manuel Romero Paz

DIRECTOR DEL PROGRAMA

f. _____

MSc. Orlando Philco Asqui

REVISOR

f. _____

MSc. Luis Córdova Rivadeneira

REVISOR

ÍNDICE GENERAL

Índice de tablas	XI
Índice de figuras	XII
Resumen	XIII
Abstract	XIV
Introducción	15
Justificación	15
Antecedentes del problema	16
Problema a resolver	17
Objeto de estudio	17
Objetivo general	17
Objetivos específicos	17
Hipótesis	17
Metodología	18
Capítulo 1 Fundamentos teóricos de RFID	19
1.1 Características del tag (Etiqueta)	19
1.2 Características del lector	21
1.3 Clasificación de los sistemas RFID	22
1.4 Bandas de frecuencias de RFID	25
1.5 Funcionamiento general de RFID	27
1.6 Antenas en el sistema RFID pasivo	31
1.6.1 Parámetros importantes en las antenas de etiquetas de RFID pasivas	31
1.7 Identificador de tarjetas RFID	35
1.8 Comparación entre RFID y el código de barras	37
1.9 Limitaciones de RFID	38
1.10 Aplicaciones de RFID	40
1.10.1 Seguridad	41
1.10.2 Trazabilidad de alimentos	42
1.10.3 Monitoreo y control de inventario	43
1.10.4 Identificación y seguimiento de equipajes	43
Capítulo 2. Materiales y métodos	44
2.1 Tecnología RFID en la banda de UHF	44
2.1.1 Tipos de antenas incorporadas en las etiquetas RFID en UHF	44

2.2	Línea de transmisión metamaterial basada en SRR	46
2.3	Estructuras coplanares de guía de onda	51
2.4	Capacitor interdigital cargado	54
2.5	Diseño de una etiqueta de RFID pasiva	58
2.5.1	Requisitos de la antena	58
Capítulo 3	Diseño y simulación de una antena tag RFID pasiva en UHF	64
3.1	Diseño de la antena	64
3.2	Estructura de la antena diseñada	66
3.3	Resultados de la simulación	67
3.4	Conclusiones del capítulo	69
	Conclusiones	70
	Recomendaciones	72
	Glosario de términos	73
	Bibliografía	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Principales características de tags pasivos y activos	23
Tabla 1.2. Frecuencias de operación de los sistemas RFID	25
Tabla 1.3. Circuitos integrados comerciales de RFID	34
Tabla 1.4. Comparación entre el código de barras y RFID	38
Tabla 3.1. Parámetros de diseño de la antena propuesta	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Tipos de modulación de la tecnología RFID	26
Figura 1.2. Intercambio de información entre el reader y el tag en RFID	29
Figura 1.3. Circuito equivalente del acoplamiento de impedancias	34
Figura 1.4. Impedancia de la antena y el CI y su relación con el ancho de banda de operación de la etiqueta	35
Figura 1.5. Formato de EPC	36
Figura 2.1. Medios RH (a) y LH (b)	47
Figura 2.2. Clasificación de los materiales a partir de la permitividad y permeabilidad.	48
Figura 2.3. Estructura compuesta por delgados cables metálicos que presenta una ϵ negativa y una μ positiva	49
Figura 2.4. Resonador de anillos abiertos SRR que se caracteriza por una ϵ positiva y una μ negativa.	49
Figura 2.5. Primeras estructuras LH: a) Estructura monodimensional, b) Estructura bidimensional.	50
Figura 2.6. Línea de transmisión CPW en dieléctrico sin conexión a tierra.	51
Figura 2.7. Circuito equivalente del capacitor interdigital cargado.	55
Figura 2.8. Celda unidad de un capacitor interdigital cargado.	55
Figura 2.9. Ganancia de una antena.	60
Figura 3.1. Diseño de la antena RFID propuesta.	65
Figura 3.2. Capacitor interdigital.	66
Figura 3.3. Parte real e imaginaria de la impedancia de entrada de la antena propuesta	67
Figura 3.4. Diagrama de Ganancia total de la antena propuesta.	68
Figura 3.5. Diagrama de directividad de la antena propuesta.	68
Figura 3.6. Diagrama de coeficiente de reflexión (Parámetro S11).	68

Resumen

Los sistemas de tecnología RFID (*Radio Frequency Identification*, 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 UHF (*Ultra High Frequency*). 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 (*High Frequency Structure Simulator*), 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 (Ultra High Frequency) RFID passive tag antenna with capacitive loaded coplanar waveguide charged with interdigital capacitors is made, using simulation software HFSS 15 (High Frequency Structure Simulator), and showing the radiation characteristics of the antenna design.

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

Introducción

La identificación por radiofrecuencia (RFID) ha llegado a ser una tecnología muy popular y con extenso 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 (González, 2011). 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 (Ahson & Ilyas, 2008).

La RFID radica en la identificación de un componente 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 emisor tal que la potencia recibida supere el umbral mínimo para alimentar al chip que se encuentra en la etiqueta (González, 2011), y con lo cual responderá con su propio identificador (ID, *Identifier*).

Dicho ID lo recogerá el lector que se encargará de examinar su base de datos para registrar 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. (González, 2011).

Justificación

La tecnología RFID tiene varias ventajas muy importantes como: rapidez, capacidad de almacenamiento, tamaño, 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 para 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 cualquier receptor en esta tecnología, la opción de interceptar la señal e intentar proporcionar 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 (Ahson & Ilyas, 2008), (González, 2011).

Antecedentes del problema

El uso y el desarrollo de sistemas RFID han experimentado un crecimiento sustancial en la última década en muchas áreas nuevas, algunas de las cuales 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 aquellas 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, *Transmission Line*) 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 $200\mu\text{W}$.

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 UHF a la frecuencia de 915 MHz.

Objeto de estudio

Sistemas de radiocomunicaciones.

Objetivo general

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.

Objetivos específicos

- Realizar el estudio del funcionamiento de la tecnología RFID.
- Caracterizar los parámetros fundamentales que gobiernan el funcionamiento de las antenas *tags* RFID pasivas en la banda UHF.
- Diseñar la antena *tag* RFID pasiva de orden cero (ZOR) en la banda UHF con metamateriales a la frecuencia de 915MHz.
- Simular la antena *tag* RFID pasiva de orden cero (ZOR) en la banda UHF con metamateriales a la frecuencia de 915MHz diseñada mediante la herramienta computacional HFSS v15 para obtener sus características de radiación.

Hipótesis

Si se determina de manera eficiente, mediante una herramienta computacional, las características de radiación de la antena y si éstas 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 UHF.

Metodología

Esta investigación es del tipo exploratorio pues se va a explorar la técnica de las antenas *tag* RFID pasiva de orden cero (ZOR), y sus características de radiación, determinando la información escrita al respecto y mediante el método descriptivo se analizará para llegar a diseñar una antena más compacta y comprobar que la misma presenta un mejor rango de lectura para utilizarse en la banda UHF.

Se empleará el paradigma empírico-analítico y el enfoque cuantitativo al realizar operaciones matemáticas y estadísticas para determinar los parámetros que permitan analizar la radiación de la antena y su directividad.

Se utilizará el método experimental, porque se podrán cambiar las características de la antena para demostrar que presenta un mejor rango de lectura y es aplicable en la banda UHF.

Capítulo 1 Fundamentos teóricos de RFID

RFID es una técnica de almacenamiento y recuperación de datos remotos que emplea unidades conocidas como tags. 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 en las que estas operan. También se realiza una breve comparación de esta magnífica tecnología con el conocido código de barras.

Generalmente RFID está compuesto de cuatro elementos fundamentales: tarjetas, lectores, antenas y una computadora. Las tarjetas están formadas por un integrado y una antena flexible colocada en una superficie plástica (DocSlide, 2006). 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 recibir respuesta de una tag RFID, el lector emite una señal de radio, y si la etiqueta está dentro del alcance de la onda emitida, contesta identificándose. Estas señales pueden transmitir energía dependiendo del tipo de etiqueta. Las tags pueden leerse remotamente sin contacto físico o sin ser visible al lector. El alcance de un lector para comunicarse con una tag es el rango de lectura (DocSlide, 2006). Algunos lectores cuentan con un módulo programador que permite escribir información en las etiquetas.

1.1 Características del tag (Etiqueta)

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*, Circuito Integrado o 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. (González, 2011).

- **Banda de frecuencias:** Dependerá de la regulación del país donde vaya a ser usado el *tag*.
- **Tamaño y forma:** Debe 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. (González, 2011).
- **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) (Seshagiri, Nikitin, & Lam, 2005). (González, 2011). 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.
- **Costo:** La etiqueta de RFID debe ser un dispositivo de bajo costo. 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 substratos 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 cancele mutuamente, con el objetivo de tener como resultado 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. (González, 2011). Generalmente las antenas han sido diseñadas para impedancias de 50 o 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. (González, 2011).

1.2 Características del lector

El lector en esta tecnología suele ser un dispositivo 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 indispensables:

- **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 costos.
- **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 (González, 2011). 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.
- **Costo:** Dado que no se requiere de una fabricación masiva de lectores, debido a que con uno se pueden controlar multitud de tarjetas, su costo no será un factor limitante en el desarrollo del sistema. (González, 2011).
- **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 m., para la obtención de polarización circular. (González, 2011).
- **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 (Cardama, y otros, 2002). 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 a 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. (González, 2011).

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 de modo activo recae en el hecho de que las primeras 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, en las tarjetas que operan en el modo pasivo, la alimentación del chip es inducida a partir de la señal 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 la tarjeta se despierta, y cuando no se supera el umbral o finaliza la transmisión, la tarjeta se duerme (Finkenzeller K. , 2003).

Con la batería también se alimenta 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 desventajas, tales como batería finita, mayores dimensiones y alto costo (Wilas, Jirasereeamornkul, & Kumhom, 2009). (González, 2011).

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 las pasivas y casi tanto como las activas, mientras que su tamaño es más reducido que las activas. 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 (Wilas, Jirasereeamornkul, & Kumhom, 2009), (González, 2011). Un resumen de las características de las tarjetas pasivas y las activas se pueden observar en la tabla 1.1:

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

Elaborada por la Autora

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 (Herraiz-Martinez, Ugarte-Munoz, Gonzalez-Posadas, Garcia-Munoz, & Segovia-Vargas, 2009), (González, 2011).

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 costos 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 esto 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 acoplamiento entre ambos radio-enlaces (Herraiz-Martinez, Ugarte-Munoz, Gonzalez-Posadas, Garcia-Munoz, & Segovia-Vargas, 2009). 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. 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.

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

Elaborada por la Autora

Los datos se envían mediante una modulación, en la que se modifica la frecuencia o amplitud para poder realizar la transmisión. En el caso de la modulación por amplitud (AM, *Amplitude Modulation*), 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, *Frequency Modulation*) 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 se 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.

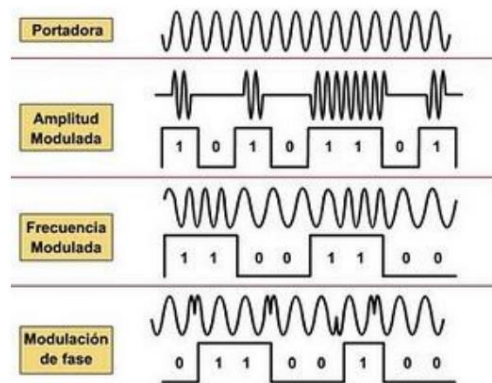


Figura 1.1. Tipos de modulación de la tecnología RFID.

Fuente: (Herraiz-Martinez, Ugarte-Munoz, Gonzalez-Posadas, Garcia-Munoz, & Segovia-Vargas, 2009)

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 bosqueja el límite del vector del campo eléctrico a un trecho de la antena al modificarse 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 se puede manipular según las 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 según las 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 (Direct Current) para las tarjetas que trabajan en el modo pasivo (Ahson & Ilyas, 2008), 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 (Finkenzeller K. , 2003):

- ✓ *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 es 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 RF transmitida por el lector en el momento en 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 períodos 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 CW, que es cuando la impedancia de la tarjeta modula la señal por *backscatter* (Nikitin & Seshagiri, Theory and Measurement of Backscattering from RFID tags, 2007).

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.

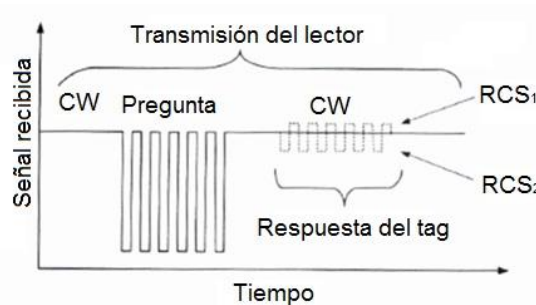


Figura 1. 2. Intercambio de información entre el reader y el tag en RFID. En el momento de la transmisión de la onda continua (CW) es cuando el tag responde mediante backscatter.
Fuente: (Nikitin & Seshagiri, *Theory and Measurement of Backscattering from RFID tags*, 2007)

Habiéndose 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 (Application Specific Integrate Circuit, 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 corresponde a la máxima trayectoria desde el cual 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 (Nikitin P. , y otros, 2005).

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, la ganancia del lector y la 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) (Seshagiri, Nikitin, & Lam, 2005).

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

La ecuación (1.4) es útil para los diseñadores al determinar el alcance máximo de la etiqueta. Normalmente, el enfoque de 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 IC), 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-IC.

- **Ganancia:** es la relación de la energía de radiación en un sentido determinado con relación a la energía de radiación producida por una antena ideal (isotrópica) (Castro, 2014). 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 (Rida, Vyas, Wu, Li, & Tentzeris, 2007).

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

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 IC determinan su funcionamiento óptimo. El circuito equivalente que representa dicho acoplamiento se muestra en la figura 1.3.

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 IC. En la tabla 1.3 se muestran varios tipos de IC 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 (Rida, Vyas, Wu, Li, & Tentzeris, 2007).

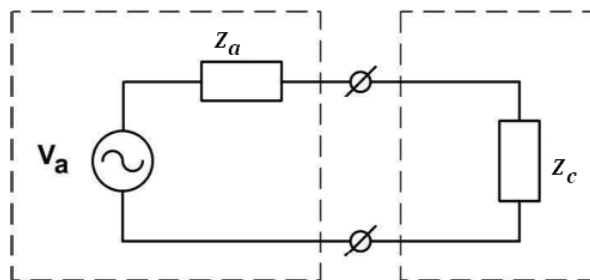


Figura 1.3. Circuito equivalente del acoplamiento de impedancias.
Fuente: (Rida, Vyas, Wu, Li, & Tentzeris, 2007)

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

Elaborada por la Autora

El comportamiento del acoplamiento de impedancias entre una antena y el IC se muestra en la figura 1.4, donde se tiene la impedancia de la antena y el IC (gráfico superior) y la respuesta de potencia de la etiqueta (grafico 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 IC 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:

$$Z_{CI} = R_{CI} + jX_{CI} \quad (1.13)$$

$$Z_a = R_a + jX_a \quad (1.14)$$

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

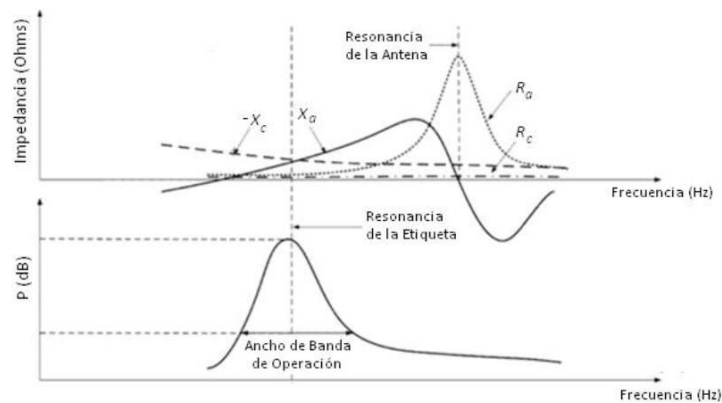


Figura 1.4. Impedancia de la antena y el CI y su relación con el ancho de banda de operación de la etiqueta.

Fuente: (Rida, Vyas, Wu, Li, & Tentzeris, 2007)

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 (EPCglobal, 2008).

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 1.5.



Figura 1.5. Formato de EPC.
Fuente: (EPCglobal, 2008)

Encabezado: registra la traducción numérica del código por sí mismo (DocSlide, 2006).

Administrador EPC: reconoce una empresa como responsable de conservar la condición del producto y dígito serial. EPC Global establece el Administrador General a un ente, certificando que cada uno de estos dígitos sean únicos (DocSlide, 2006).

Tipo de artículo: representa el tipo exacto de artículo a identificar.

Dígito Serial: significa un único identificador para el artículo en cada clase de artículo. El ente administrador es garante de la asignación unívoca de dígitos seriales no repetidos para cada solicitud en cada clase de artículo (DocSlide, 2006).

1.8 Comparación entre RFID y el código de barras

El método de lectura utilizado por los lectores ópticos de código de barra necesitan confirmación de vista directa, así el lector muestra si puede leerlo dentro de su alcance, así una lectura errónea se relaciona con una tag y un artículo determinados. En RFID la lectura no necesita línea de vista para conseguir los datos de la tag.

Una onda de radiofrecuencia puede cruzar por muchos materiales, lo cual es una ventaja al recibir productos en establecimientos y en procesos en que los datos se recogen de artículos con distribución heterogénea.

En RFID el lector puede diferenciar e interactuar con una tag particular aunque muchas de ellas estén al alcance de un lector específico. Sin embargo esa diferenciación de tags no proporciona la localización exacta de un artículo como lo hace el código de barras en casos en que el destino es un espacio definido en la línea de embalaje.

Las tags RFID pueden leerse con mayor velocidad que las de código de barras a 1.000 o más por segundo teóricamente, prevaleciendo largamente a la rapidez de lectura por unidad del código de barras.

Es posible obtener más seguridad incrustando las tags RFID en sustratos de plástico rígido u otros materiales, así son mucho más perdurables que las de código de barra, pero las dos dependen del pegamento que las conserva intactas y unidas a un artículo (DocSlide, 2006).

La debilidad de una tag RFID es la unión de la antena con el integrado, si algo estropea esa unión se inhabilitará la tag, en cambio el código de barras únicamente se atenuaría ligeramente.

En RFID sus etiquetas pueden ejecutar instrucciones de lectura y escritura, actualizando los datos en tiempo real de un artículo moviéndose en una cadena de

suministro. Por otro lado, mantienen datos en forma cautiva, entregándola sólo al lector especificado para recoger esa información. En cambio, los códigos de barra comúnmente presentan una configuración comprensible con escrituras humanas incluidas, por lo cual se puede recobrar directamente los datos si el código de barras falla en la lectura. Una mezcla de tags RFID con código de barras y signos humanos comprensibles brinda la mejor opción de redundancia e integridad de los datos (DocSlide, 2006).

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

Elaborada por la Autora

1.9 Limitaciones de RFID

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

1) Pobre rendimiento con objetos absorbentes

El empleo de frecuencias UHF altas o microondas, con artículos construidos con metales, materiales absorbentes o empacados en un material con tales tipologías, puede provocar errores totales o parciales en la lectura de la información de la tarjeta, por eso algunas tags se crean principalmente para aplacar varios inconvenientes al leer en esa clase de materiales. La evolución de la tecnología reducirá esas complicaciones frecuentes relacionadas con artículos oscuros y absorbentes a corto plazo (DocSlide, 2006).

2) Impactada por el medio ejecutor

Si dicho ambiente incluye grandes cantidades de metal y líquidos, se perturbará la precisión de la lectura de las tags según la frecuencia, por lo que en estos entornos debe garantizarse una línea de vista directa entre el lector y las tags. No obstante las características primordiales son el alcance de lectura de la etiqueta, la potencia producida por el lector y la disposición de su antena y deben configurarse en estos casos, una línea de vista ayudará a mejorar el rendimiento. En otros casos esto no ocurre, por ejemplo, en un entorno ejecutor con alto tráfico de personas, pues éstas tienen mucho líquido, el cual absorbe las ondas de radiofrecuencia en UHF y microondas. De esta manera, si alguien está entre el lector y una tag, hay una alta probabilidad de que el lector no lea la etiqueta hasta que la persona se retire. Además, la presencia de otra clase de redes WiFi en el entorno de trabajo, podrían obstaculizar el trabajo del lector. También los motores y controladores eléctricos pueden producir ruido y afectar el rendimiento del lector (DocSlide, 2006).

3) Inconveniente de lecturas diversas

La cantidad de etiquetas que un lector puede reconocer de manera inequívoca por unidad de tiempo es pequeño. Para lograr esa cantidad, el lector debe conseguir variadas respuestas de cada tag por segundo, porque emplea algoritmos anti-colisión para reconocerlas, en este contexto, se necesitan respuestas repetidas de las tags antes que el lector establezca los datos de una etiqueta de manera inequívoca (DocSlide, 2006).

4) Efecto de la interferencia del hardware

En RFID los lectores podrían causar choques si fueron colocados inadecuadamente. Un choque ocurre si los alcances de dos lectores se superponen y la emisión de uno de ellos obstaculiza la del otro. Estos inconvenientes deben estudiarse al precisar y ejecutar un procedimiento RFID para certificar la adecuada operación del mismo, de otro modo la transmisión se atenuará, perturbando gravemente el desempeño del procedimiento. Por consiguiente, RFID tiene que poseer un dispositivo inteligente con filtros para excluir lecturas

duplicadas de tags. La evolución de la tecnología permitirá remediar estos inconvenientes (DocSlide, 2006).

5) Penetración restringida de la potencia RFID

Esta depende fundamentalmente de la energía del transmisor del lector y del período de trabajo, que son controlados en algunos países, es decir que un lector puede equivocarse al leer varias cajas en un contenedor si están amontonadas muy abajo, más aún si son de materiales que perturban las ondas RF. Solo puede alcanzarse una solución mediante experimentación, pues es muy improbable, hacerlo de manera teórica. En conclusión, este inconveniente seguirá mientras se mantengan las prohibiciones y medidas internacionales respecto a la energía del lector y los períodos de trabajo (DocSlide, 2006).

6) Tecnología Inmadura

El desarrollo de los procesos es un tema de conocimiento que se plantea RFID, su solución será tan sólida como el hardware adecuado lo admita. Los productores tratan de desplegar dispositivos eficaces, pero la solución total no se alcanzará a corto plazo. Actualmente, las etiquetas pasivas UHF empleadas en procesos en la cadena de suministro se deterioran al ser operadas, estos casos sobrepasan el 10% (DocSlide, 2006).

1.10 Aplicaciones de RFID

RFID es una tecnología inalámbrica compacta y en auge para la identificación de objetos, 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 (Finkenzeller K. , 2003). (González, 2011).

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 mínima 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. (González, 2011).

1.10.1 Seguridad

La tecnología RFID permite realizar un seguimiento en tiempo real para la mejora de las aplicaciones antirrobo, por ejemplo permitiendo 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 práctico de este sistema sería, por ejemplo, acoplar una tarjeta RFID (preferiblemente pasiva debido a sus beneficios y al costo reducido) a los objetos de mayor valor. Así, ubicando el lector cerca de los objetos etiquetados, cuando uno de ellos sale del estante, se 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. (González, 2011).

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 (González, 2011). Veselago (1968) propone 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, autos 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 (Global Positioning System) u otro tipo de sistemas. (González, 2011). 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 anticipación a los sistemas de alarma.

1.10.2 Procedimientos de seguimiento de alimentos

Estos procedimientos se identifican de esta manera:

- Adherir una tag con un identificador particular en un artículo para ejecutar su rastreo.
- Reconocer dicha identificación en sitios definidos durante el recorrido del artículo en la fábrica.

El identificador del artículo, si se articula con el tiempo, el momento de la lectura y los datos de la localización, suministra información en tiempo real respecto del destino del artículo en un tiempo determinado, esto se emplea para rastrear el recorrido del ítem en su período de vida y esto es beneficioso para establecer la responsabilidad del personal en el trabajo de la planta. Además es posible articular algunas actividades con el proceso de rastreo, por ejemplo la producción de una alarma si un artículo no se encuentra en una ubicación establecida al tiempo programado. Los procedimientos de seguimiento convencionales dedicados al rastreo del artículo emplean etiquetas pasivas de alcance restringido, estos necesitan que la tag recorra diferentes sitios de revisión para ser reconocidos. En las plantas de alimentos es posible efectuar el seguimiento de un ítem recolectado en un vagón mientras se traslada en la fábrica y la cadena de producción. RFID

admite certificar en tiempo real que un vagón determinado fue despachado a la sección debida en la sucesión adecuada. En estas plantas una plataforma estándar contiene una humedad del 6% al 12%, en cambio una fresca puede llegar al 30%, pudiendo provocar desgaste de potencia en las tags empleadas, siendo suficiente para restringir el alcance de lectura. A causa de esto los ítems deben ser examinados previamente para prevenir sobresaltos como la humedad contenida. La implementación de un proceso de seguimiento RFID, es necesario certificar una manera de marcar meticulosamente los vagones para que las tags no vayan dentro del género y contaminen el proceso por el contacto con los alimentos. Las tags deben soportar también las situaciones de limpieza, vapor y presión alta (DocSlide, 2006). (González, 2011).

1.10.3 Monitoreo y control de inventario

Las grandes aerolíneas poseen inventarios de miles de piezas con un valor de millones de dólares y la gestión de esos inventarios se efectúa de manera manual y consecuentemente con alto nivel de equivocación. Para estos casos las tags RFID que trabajan en 13.56 MHz son sugeridas porque operan en entornos y géneros metálicos, pero poseen un limitado alcance para leer y/o escribir.

1.10.4 Identificación y rastreo de maletas

Al implantar tags RFID en identificaciones de maletas en aerolíneas es posible usarlas para brindar una forma práctica de rastreo. Considerando que las tags RFID poseen gran capacidad para guardar datos acerca del equipaje y la ruta, los cuales serían aprovechables localmente, obviando el tener que acceder al procesador central o a bases de datos. A diferencia de los códigos de barra, las tags RFID pueden leerse en cualquier alineación aunque las maletas estén mezcladas, se tiene así una lectura más rápida y precisa que con 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 IC establecidas por los fabricantes.

Capítulo 2. Materiales y métodos

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

2.1 Tecnología RFID en la banda de UHF.

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

La identificación de productos u objetos utilizando la banda de frecuencias 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 $200\mu\text{W}$.

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

Las antenas instaladas en un tag obedecen a su función, objetivo y la periodicidad de trabajo, aquellas de LF (Low Frequency) regularmente usan inducción electromagnética, donde el voltaje inducido es proporcional a la frecuencia, y puede generar la tensión necesaria para sostener un circuito integrado. Hay tags LF compactos que utilizan una antena en varios niveles (tres de 100-150 espiras cada uno) en un núcleo de ferrita.

En HF (High Frequency, 13.56 MHz) se utiliza una espiral de 5 a 7 vueltas similar a una tarjeta de crédito, obteniendo alcances de decenas de centímetros. Son más económicas que las LF y pueden elaborarse en litografía en vez de usar espiras, se requiere dos planos metálicos y uno aislante para establecer la conexión cruzada

del nivel exterior al interior de la espiral, donde está el condensador de resonancia y el integrado.

Los *tags* pasivos en UHF, que son los de interés en este trabajo se conectan por radio a la antena del lector y emplean antenas clásicas de dipolo, que no se adaptan mucho a las tipologías de los integrados típicos con alta impedancia de entrada y levemente capacitiva. También se emplean dipolos plegados o bucles cortos como estructuras inductivas complementarias para mejorar el suministro. Los dipolos de $\lambda/2$ (16 cm a 915 MHz) son muy grandes en muchos trabajos considerando que los *tags* deben medir máximo 10 cm y es necesario arquear las antenas para compensar el tamaño.

Otra solución sería emplear antenas de banda ancha. La ganancia de las antenas compactas es menor que un dipolo (menos de 2 dBi) y se asumen isotrópicas en el plano perpendicular a su eje.

Los dipolos se conectan con la radiación polarizada en sus ejes, así la cobertura de un *tag* con antena de dipolo simple obedece a su orientación. Los *tags* de doble dipolo obedecen menos a eso y a la polarización de la antena del lector, aunque son más grandes y costosas que las sencillas. Otra solución es emplear antenas de parche para trabajar contiguo a planos metálicos, en este caso se requiere un espesor de 3-6 mm para conseguir un buen ancho de banda, también se requiere una conexión a tierra lo cual las hace más costosas que una antena simple (Capelo & Cruz, 2009).

Diseñar una antena para un *tag* es una composición de ciencia y arte, especialmente en UHF. Actualmente muchos diseños se obtienen de complejos softwares de modelación, adicionando el saber y la experiencia obtenidos en otros servicios RF. Los modelos y tamaños de las antenas son muchos y diferentes (Montenegro & Marchesin, 2007).

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 (Wen, 1969), quien 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 magnético y el 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.

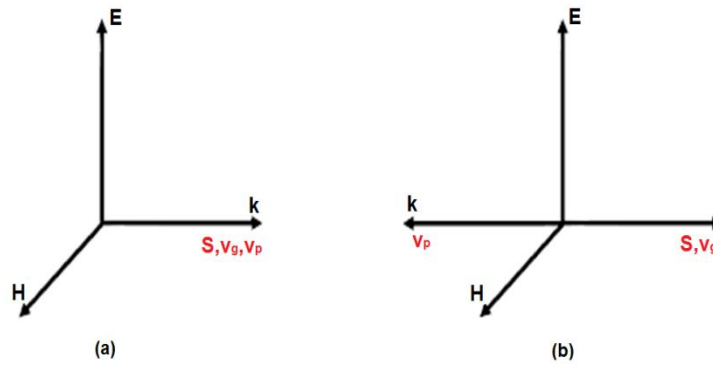


Figura 2.1. Medios RH (a) y LH (b)
Fuente: (Wen, 1969)

Además de lo mencionado anteriormente, Veselago (1968) 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 (Wen, 1969).

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.

$$\beta = \frac{\omega \sqrt{\epsilon_r \mu_r}}{c} \quad (2.1)$$

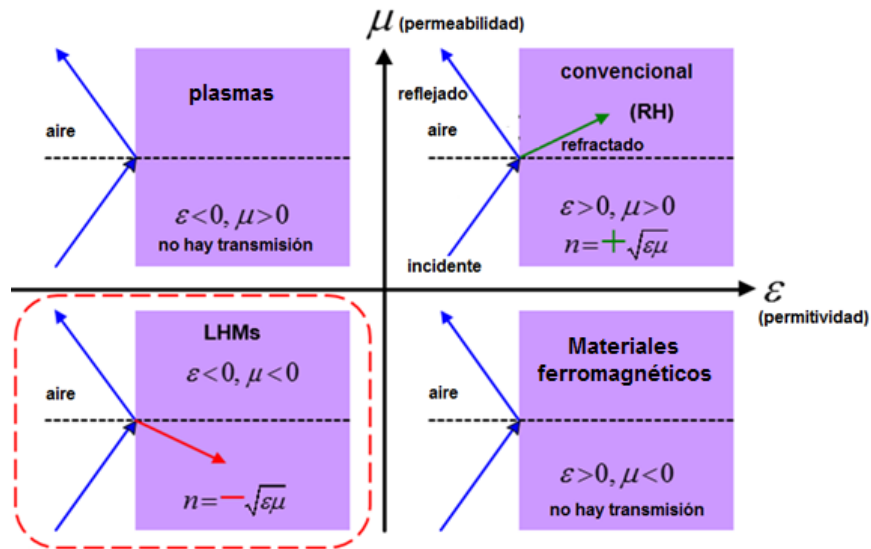


Figura 2.2. Clasificación de los materiales a partir de la permitividad y permeabilidad.
Fuente: (Wen, 1969)

En el segundo y cuarto cuadrante, la permitividad y la permeabilidad son negativas 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 (Wen, 1969).

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 (Wen, 1969).

Veselago (1968) puntualizó que los campos eléctrico y 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 (1999) y su grupo de investigación en la Universidad de California, San Diego (UCSD, University of California, San Diego), 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 figuras 2.3 y 2.4 se muestran dichos metamateriales (Collin, 2001).

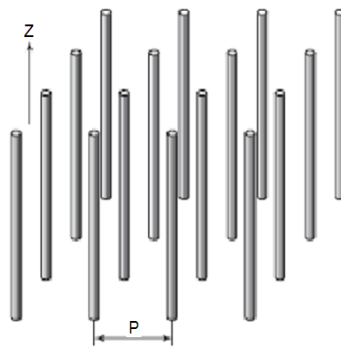


Figura 2.3. Estructura compuesta por delgados cables metálicos que presenta una ϵ negativa y una μ positiva.

Fuente: (Collin, 2001)

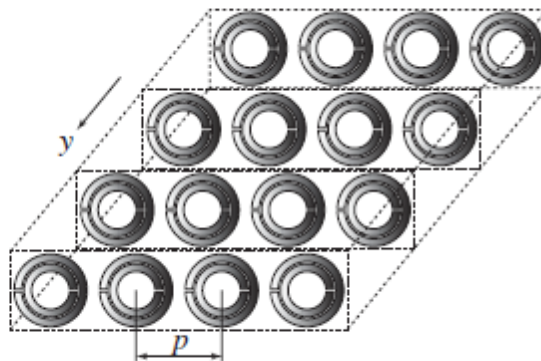


Figura 2.4. Resonador de anillos abiertos SRR que se caracteriza por una ϵ positiva y una μ negativa.

Fuente: (Collin, 2001)

Una posible solución para la síntesis de medios LHM (Left Handed Middle) 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, se verán 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 o su permeabilidad negativas.

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

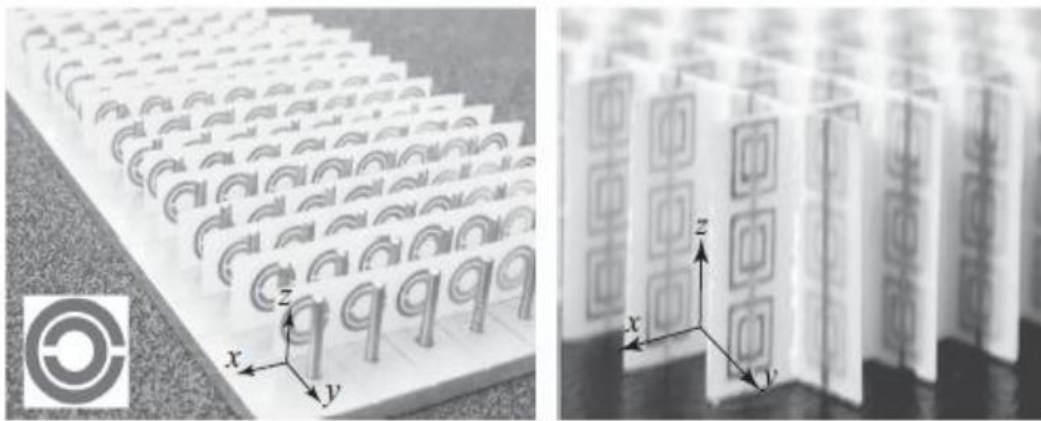


Figura 2.5. Primeras estructuras LH: a) Estructura monodimensional, b) Estructura bidimensional.
Fuente: (Collin, 2001)

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 acarream 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, se encuentran 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 se encuentran 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 (Collin, 2001).

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 cual 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 montar componentes de parámetros concentrados entre los dos planos y es más fácil de realizar configuraciones de derivación y en serie.

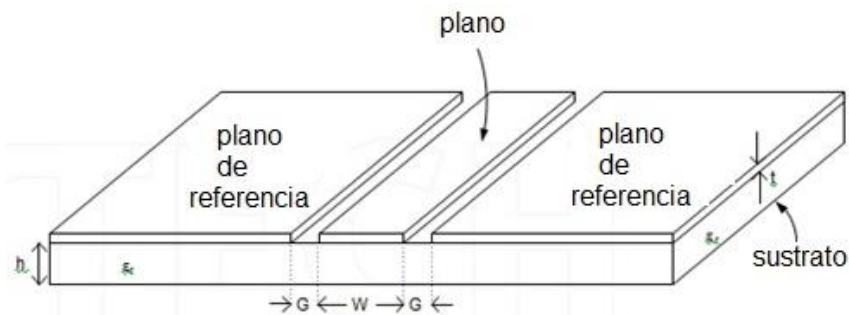


Figura 2.6. Línea de transmisión CPW en dieléctrico sin conexión a tierra.

Fuente: (Lai, Chiu, Li, & Chen, 2011)

El condensador interdigital cargado fue propuesto por primera vez por Wen (Gupta, Garg, Bahl, & Barthia, 1996) y desde entonces se han utilizado ampliamente en las comunicaciones inalámbricas. La desventaja de la guía de onda coplanar (CPW) es que puede ser difícil 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 (Lai, Chiu, Li, & Chen, 2011) 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 (Pozar, 2012):

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

Y

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

Dónde:

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

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

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

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

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

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

Donde W es la anchura del conductor central, G es la separación entre el conductor central y el 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 reportada en (Pozar, 2012) 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 (Pozar, 2012):

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

Dónde:

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

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

Y

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

La atenuación es constante debido a las pérdidas dieléctricas y se determina como (Pozar, 2012):

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

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 (Pozar, 2012):

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

A continuación, estas expresiones se utilizarán para introducir el CPW capacitor interdigital 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 (Caloz & Itoh, 2006). El modelo 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 dividida 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.

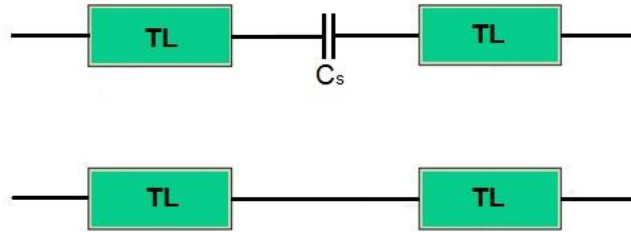


Figura 2.7. Circuito equivalente del capacitor interdigital cargado.
Fuente: (Caloz & Itoh, 2006)

La geometría de la unidad de celda 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 unidad de celda puede ser repetida periódicamente para diseñar la antena ZOR.

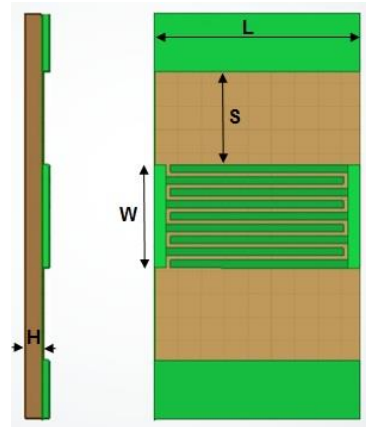


Figura 2.8. Celda unidad de un capacitor interdigital cargado.
Elaborado por la Autora

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 sigue:

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

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 así (Caloz & Itoh, 2006):

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

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 unidad de celda 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:

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

Dónde:

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

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

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

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

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 unidad de celda, mientras α_{CPW} y 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:

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

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

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 derechos 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

Este trabajo describe los parámetros que son importantes para el diseño de antenas de RFID pasivas. 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 aproximadas para otros, pero en todos los casos las ecuaciones 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, Field Of View).
- ✓ 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) con las dimensiones físicas de una abertura radiante se muestra en las siguientes ecuaciones:

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

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 (D): de una antena es una medida de la concentración de la energía radiada en una orientación específica. También puede decirse que es la habilidad de la antena para dirigir la potencia transmitida en una trayectoria determinada. Por lo general es la relación de intensidad de radiación en una orientación específica 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 (G): es la razón de la energía que llega a una antena y la que se emite de la misma y generalmente se da en decibelios, y se considera como la relación de la potencia radiada de la antena a la emitida por una antena isotrópica, es decir la que presenta un patrón de radiación esférico perfecto y una ganancia lineal unitaria (Figura 2.9).

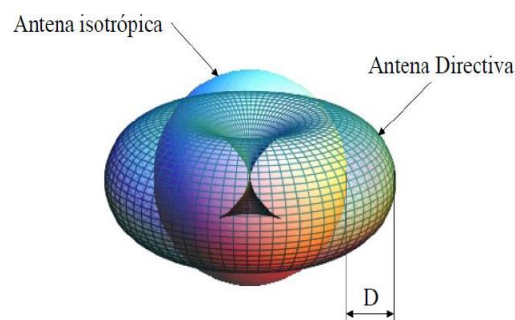


Figura 2.9. Ganancia de una antena.
Fuente: (Pozar, 2012)

Es posible 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: es la razón de la potencia emitida y la recibida en la antena o 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 y perpendiculares entre sí, es decir, un componente vertical y horizontal.

Para una óptima eficiencia (lectura a distancia) en un sistema RFID, las polarizaciones de las antenas del tag y del lector deben concordar. 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 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 vertical u horizontal. Cuando la antena es polarizada circularmente transmite toda la potencia del transmisor en una onda polarizada circularmente, que está compuesta de dos componentes linealmente polarizados 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 permite 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 (Bw, Bandwidth) 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 referirse al ancho de banda de una antena, se debe 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.

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

Dónde:

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.

Capítulo 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-IC 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 ella, 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, éste apoya la propagación de la onda a lo largo de la antena de una manera similar a los capacitores interdigitales (Caloz & Itoh, 2006). 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 (Caloz & Itoh, 2006), 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.

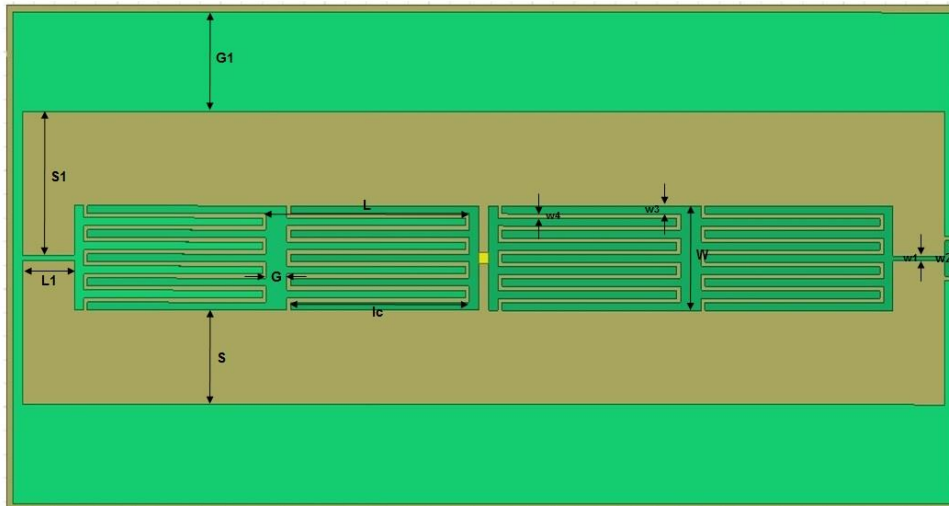


Figura 3.1. Diseño de la antena RFID propuesta.
Elaborada por la Autora

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

Elaborada por la Autora

Dónde:

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 busca 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.

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

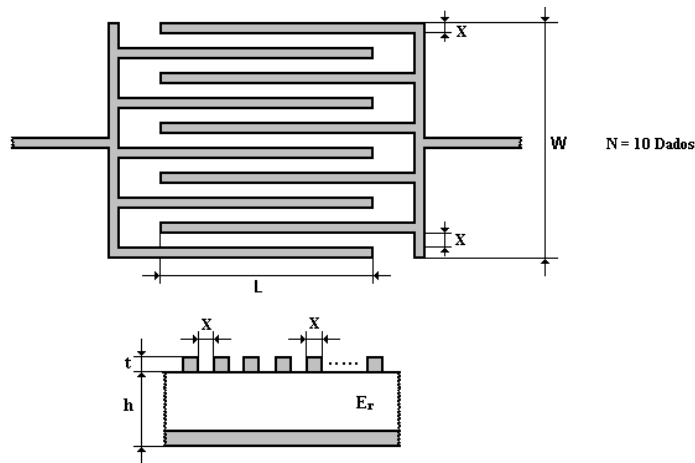


Figura 3.2. Capacitor interdigital.
Fuente: (Caloz & Itoh, 2006)

Dónde:

$$A_1 = \left(0.3349057 - 0.1528711 \left(\frac{t}{x} \right) \right)^2 \left(\frac{\text{pF}}{\text{pulg}} \right) \quad (3.2)$$

$$A_2 = \left(0.50133101 - 0.2282044 \left(\frac{t}{x} \right) \right)^2 \left(\frac{\text{pF}}{\text{pulg}} \right) \quad (3.3)$$

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. Dicho IC presenta 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.

En la figura 3.3, se puede observar que los valores de la 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.

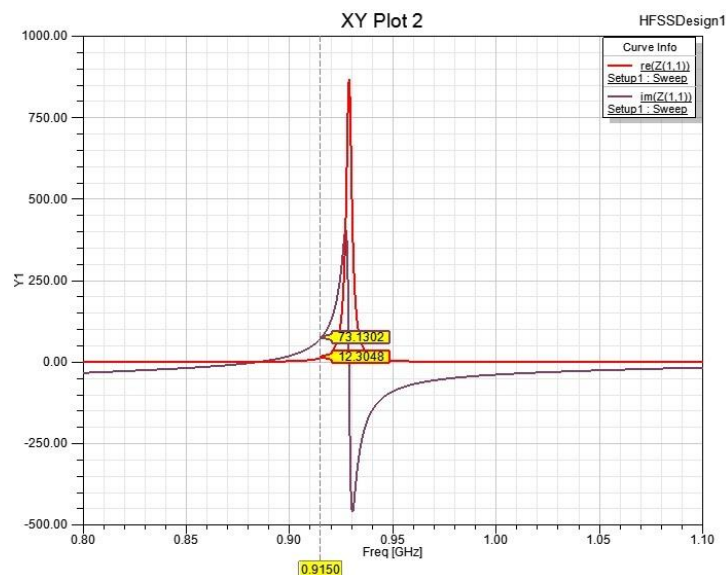


Figura 3.3. Parte real e imaginaria de la impedancia de entrada de la antena propuesta.
Elaborada por la Autora

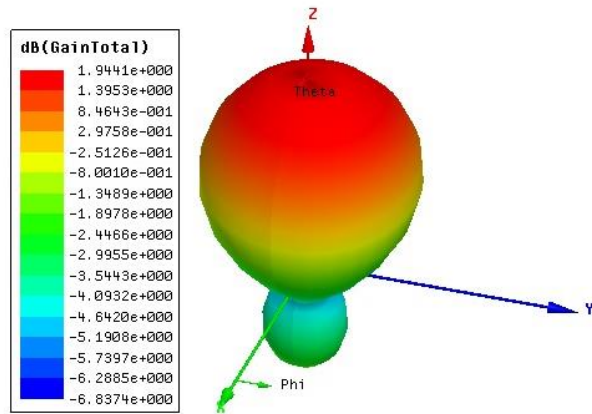


Figura 3.4. Diagrama de Ganancia total de la antena propuesta.
Elaborada por la Autora

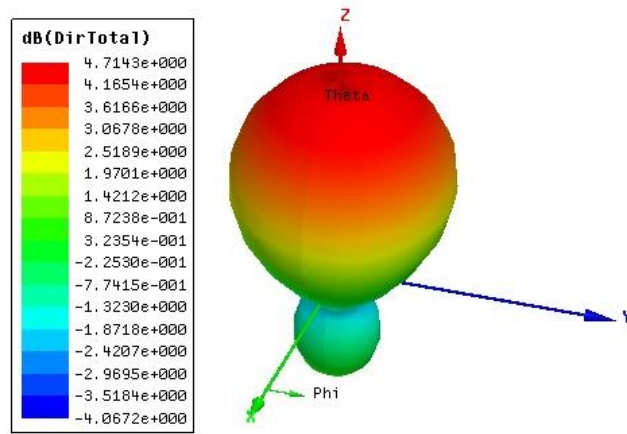


Figura 3.5. Diagrama de directividad de la antena propuesta.
Elaborada por la Autora

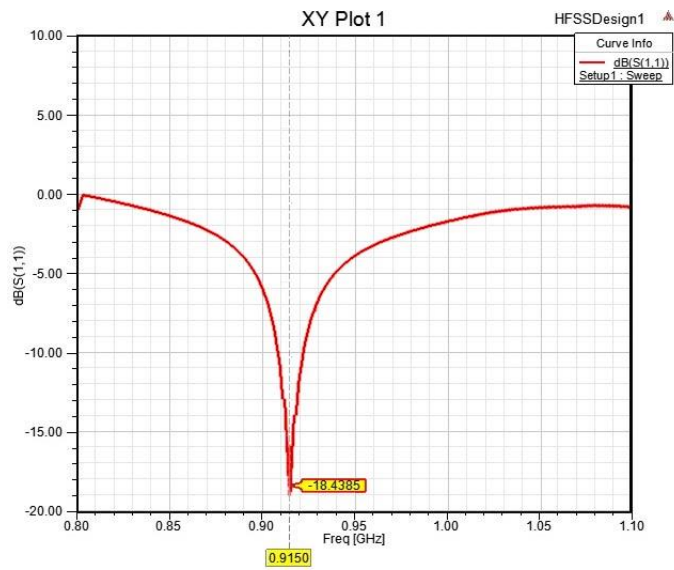


Figura 3.6. Diagrama de coeficiente de reflexión (Parámetro S11).
Elaborada por la Autora

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 cual se logra la mayor ganancia que puede lograr el dispositivo, aproximadamente 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 muestra 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, se puede 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, nacionales o internacionales, por ejemplo 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 19.6m, 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

- Se realizó el estudio del funcionamiento de la tecnología RFID, comprendiéndose la importancia que tienen las antenas de etiquetas de RFID en el desempeño global del sistema.
- Se efectuó un estudio acerca de los metamateriales, haciendo un especial énfasis en los planares que consisten de una línea de transmisión de guía de ondas coplanar, estas estructuras artificiales tienen características electromagnéticas especiales, con topología periódica o cuasi-periódica y presentan propiedades controlables, que a veces no se encuentran en la naturaleza. Este comportamiento electromagnético inusual es debido a la permitividad (ϵ) y permeabilidad (μ) simultáneamente negativas, que caracterizan a estos materiales y los diferencian de los demás.
- Se realizó la caracterización de los parámetros fundamentales que gobiernan el funcionamiento de las antenas tags RFID pasivas en la banda UHF. 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.
- Se diseñó la antena tag RFID pasiva de orden cero (ZOR) en la banda UHF con metamateriales a la frecuencia de 915MHz. 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 IC establecidas por los fabricantes.
- Se realizó la simulación de la antena tag RFID pasiva de orden cero (ZOR) en la banda UHF con metamateriales a la frecuencia de 915MHz diseñada mediante la herramienta computacional HFSS v15 para obtener sus características de radiación.

Por lo expuesto, se concluye que se cumplió el objetivo general de este trabajo, puesto que se realizó el diseño, simulación y optimización de una antena tag RFID pasiva con metamateriales en UHF, a la frecuencia de 915 MHz, utilizando la herramienta computacional HFSS v15, con cuyos resultados se realizó un resumen de las características de la propagación zurda, guías de ondas coplanar y del

capacitor interdigital, el uso de los cuales 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 anexó 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 las etiquetas RFID UHF pasivas disponibles en el mercado hoy en día.

Recomendaciones

- Profundizar en el estudio de la tecnología RFID, especialmente en la importancia de las antenas de etiquetas de RFID para el sistema.
- Continuar analizando las características principales de estas antenas y su efecto directo en el rendimiento de la etiqueta y su relación con el alcance de lectura máxima del sistema de RFID.
- Realizar estudios para reducir el tamaño máximo de la antena de resonancia de orden cero (ZOR) RFID.
- Analizar el uso de sustratos más flexibles para el diseño de la antena, tales como: sustratos Kapton.
- Desarrollar una antena multibanda a partir del diseño de la antena obtenida.

Glosario de términos

- AM: Amplitude Modulation, Modulación de Amplitud
- ASIC: Application Specific Integrate Circuit, Circuito Integrado de Aplicación Específica.
- Bw: Bandwidth, Ancho de Banda
- CPW: Coplanar Waveguide, Guía de Onda Coplanar.
- CW: Continuous Wave, Onda Continua.
- DC: Direct Current, Corriente Directa
- EPC: Electronic Product Code, Código Electrónico del Producto
- FM: Frequency Modulation, Modulación de Frecuencia
- FOV: Field Of View, Campo de Vista
- GPS: Global Positioning System, Sistema de Posicionamiento Global
- HF: High Frequency, Alta Frecuencia
- HFSS: High frequency structure simulator, Simulador de estructuras de altas frecuencias.
- IC: Integrated Circuit, Circuito Integrado o chip.
- ID: Identifier, Identificador.
- LF: Low Frequency, Baja frecuencia.
- LH: Left-handed, materiales zurdos.
- LHM: Left Handed Middle
- PIRE: Potencia Isotrópica Radiada Efectiva
- Reader: Lector.
- RF: Radio Frequency, radiofrecuencia.
- RFID: Radio Frequency Identification, Identificación por radiofrecuencia.
- RH: Right-handed, materiales diestros.
- SRR: Split-Ring Resonator, Resonador de anillos abiertos.
- Tag: Tarjeta.
- TL: Transmission Line, Línea de transmisión.
- UCSD: University of California, San Diego
- UHF: Ultra High Frequency, Ultra Alta Frecuencia.
- ZOR: Zeroth Order Resonance, Resonador de orden cero.

Bibliografía

- Ahson, S., & Ilyas, M. (2008). *RFID Handbook: Applications, Technology, Security, and Privacy*. Boca Raton, FL: CRC Press. Taylor & Francis Group.
- AnsoftCorporation. (2005). *User's guide - High Frequency Structure Simulator(HFSS)*. Pittsburgh, PA: Ansoft Corporation .
- Balanis, C. (1997). *Antenna Theory: Analysis and Design, 2nd. Edition* (Second Edition ed.). New York U.S.A.: John Wiley and Sons.
- Caloz, C., & Itoh, T. (2006). *Electromagnetic metamaterials: Transmission line theory and microwave applications. The Engineering Approach* . Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Capelo, A., & Cruz, J. (2009). *Diseño y elaboración de un sistema de seguridad vehicular con tecnología RFID, con interfaz USB 2.0 y controles de acceso codificados* . Latacunga: Escuela Politécnica del Ejército.
- Cardama, Á., Jofre, L., Rius, J., Romeu, J., Blanch, S., & Ferrando, M. (2002). *Antenas. Segunda edición* (Segunda edición ed.). Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL.
- Castro, D. d. (2014). *Aplicación de Metamateriales para el Desarrollo de Antenas Activas Autodiplexadas*. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid.
- Collin, R. E. (2001). *Foundations for Microwave Engineering. 2nd edition*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. .
- DocSlide. (2006). *Introducción a la identificación por radiofrecuencia*. Obtenido de Telectrónica Codificación S.A.: <http://documents.tips/documents/rfid5572112e497959fc0b8e880e.html>
- EPCglobal. (2008). *EPC Radio Frequency Identity Protocols Class-1 Generation-2 UHF RFID Protocol for Communications at 860 MHz-960 MHz Version 1.2.0*. Obtenido de Specification for RFID Air Interface: http://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/uhfc1g2_1_2_0-standard-20080511.pdf
- Finkenzeller, K. (2003). *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification. Second Edition*. West Sussex PO19 8SQ, England: John Wiley & Sons, Ltd.

- Finkenzeller, K. (2010). *RFID Handbook. Fundamentals and applications in contactless smart cards, radio frequency identification and near-field communication, Third Edition*. West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom: John Wiley and Sons, Ltd.
- González, I. (2011). *Sistemas RFID en UHF y Microondas*. Obtenido de Repositorio de Universidad Carlos III de Madrid. : <http://docplayer.es/14565791-Sistemas-rfid-en-uhf-y-microondas.html>
- Gupta, K., Garg, R., Bahl, I., & Barthia, P. (1996). *Microstrip Lines and Slotlines, Second Edition*. Boston: Artech House.
- Herraiz-Martinez, F., Ugarte-Munoz, E., Gonzalez-Posadas, V., Garcia-Munoz, L., & Segovia-Vargas, D. (2009). Self-Diplexed Patch Antennas Based on Metamaterials for Active RFID Systems. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques (Volume: 57, Issue: 5, May 2009)*, 1330 - 1340.
- Lai, C.-P., Chiu, S.-C., Li, H.-J., & Chen, S.-Y. (2011). Zeroth Order Resonator Antennas Using Inductor-Loaded and Capacitor-Loaded CPWs. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Volume: 59, Issue: 9, Sept. 2011* , 3448 - 3453.
- Montenegro, G., & Marchesin, A. (2007). *Sistema de identificación por radiofrecuencia (RFID)*. Obtenido de docplayer.es: <http://docplayer.es/17670510-Sistema-de-identificacion-por-radiofrecuencia-rfid.html>
- Nikitin, P., & Seshagiri, K. (2007). Theory and Measurement of Backscattering from RFID tags. *IEEE Antennas and Propagation Magazine 48(6): January 2007*, 212 - 218.
- Nikitin, P., Seshagiri, K. V., Lam, S. F., Pillai, V., Martinez, R., & Heinrich, H. (2005). Power Reflection Coefficient Analysis for Complex Impedances in RFID Tag Design. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques, Vol. 53, NO. 9, September 2005*, 2721 - 2725.
- Pozar, D. (2012). *Microwave Engineering Fourth Edition* . United States of America: John Wiley & Sons Inc. .
- Rida, A., Vyas, R., Wu, T., Li, R., & Tentzeris, M. M. (2007). Development and Implementation of Novel UHF Paper-Based RFID Designs for Anti-

- counterfeiting and Security Applications. *IEEE International Workshop on Anti-counterfeiting, Security, Identification, 16 - 18 April 2007*, 52 - 56.
- Seshagiri, K. V., Nikitin, P. V., & Lam, S. F. (2005). Antenna Design for UHF RFID Tags: A review and a Practical Application. *IEEE Transactions on antennas and propagation, Vol. 53, No. 12, December 2005*, 3870-3876.
- Veselago, V. (1968). The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Soviet Physics Uspekhi, volume 10, number 4. January - February 1968*, 509–514.
- Wen, C. P. (1969). Coplanar Waveguide: A Surface Strip Transmission Line Suitable for Non-Reciprocal Gyromagnetic Device Application. *G-MTT International Microwave Symposium, 5-7 May 1969*, 1087-1090.
- Wilas, J., Jirasereamornkul, K., & Kumhom, P. (2009). Power Harvest Design for Semi-Passive UHF RFID Tag Using a Tunable Impedance Transformation. *9th International Symposium on Communications and Information Technology, 2009. ISCIT 2009.*, 1441-1445.



**Presidencia
de la República
del Ecuador**



**Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes**



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Santos Estupiñán, Paola Andrea**, con C.C: # **0802475632** autora del trabajo de titulación: **Diseño de una antena tag RFID pasiva de orden cero (ZOR) en UHF con metamateriales** previo a la obtención del título de **Magister en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, (**día**) de (**mes**) de (**año**)

f. _____

Nombre: **Santos Estupiñán, Paola Andrea**

C.C: **0802475632**



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA			
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN			
TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Diseño de una antena tag RFID pasiva de orden cero (ZOR) en UHF con metamateriales		
AUTOR(ES)	Santos Estupiñán, Paola Andrea		
REVISOR(ES)/TUTOR	MSc. Orlando Philco Asqui; MSc. Luis Córdova Rivadeneira / MSc. Manuel Romero Paz		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Sistema de Posgrado		
PROGRAMA:	Maestría en Telecomunicaciones		
TÍTULO OBTENIDO:	Magister en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	DE 30 de noviembre de 2016	No. DE PÁGINAS:	DE 77
ÁREAS TEMÁTICAS:	RFID, Antenas, Aplicaciones de RFID, Metamateriales, Estructuras coplanares, Capacitor interdigital		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	RFID, metamateriales, guías de ondas coplanares (CPW), UHF y capacitores interdigitales		
RESUMEN/ABSTRACT: Los sistemas de tecnología RFID (Radio Frequency Identification, 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 UHF (Ultra High Frequency). 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 (High Frequency Structure Simulator), exhibiendo las características de radiación de la antena diseñada.			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTORES:	CON	Teléfono: +593-994611698	E-mail: paola_santos12@hotmail.com
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::	CON LA	Nombre: Romero Paz Manuel de Jesús	
	DEL	Teléfono: +593-994606932	
	PROCESO UTE)::	E-mail: manuel.romero@cu.ucsg.edu.ec	
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			