

**Universidad de Oriente**  
**Facultad de Ingeniería Eléctrica**  
**Departamento de Telecomunicaciones**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**Diseño y simulación de antenas y superficies  
selectivas en frecuencia (FSS) para  
dispositivos pasivos de identificación por  
radiofrecuencia (RFID).**

**Autor: Hector Luis Rodriguez Pérez**  
**Tutor: MSc. Antonio Rafael Selva Castañeda**

**Santiago de Cuba**  
**Junio, 2015**

**Universidad de Oriente**  
**Facultad de Ingeniería Eléctrica**  
**Departamento de Telecomunicaciones**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**Diseño y simulación de antenas y superficies  
selectivas en frecuencia (FSS) para  
dispositivos pasivos de identificación por  
radiofrecuencia (RFID).**

**Autor: Hector Luis Rodriguez Pérez**

hector.rodriguez@tle.fie.uo.edu.cu

**Tutor: MSc. Antonio Rafael Selva Castañeda**

Profesor Asistente, Departamento de Radiocomunicaciones, FIE

aselva.fie.uo.edu.cu

**Santiago de Cuba**

**Junio, 2015**



## **COMPROMISO DEL AUTOR**

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

---

Firma del Autor

# PENSAMIENTO

*"No existe en el mundo, nada más poderoso que una idea a la que ha llegado su tiempo."*

*Victor Hugo*

## DEDICATORIA

A mis padres, por el sacrificio de tantos años.

## AGRADECIMIENTOS

La realización de una tesis es el resultado de meses de investigación y años de estudio, a lo largo del camino muchos han aportado su granito de arena en mi formación, por tanto sería imposible no pensar en aquellos que me han ayudado a llegar hasta aquí.

En primer lugar agradezco de forma general a toda mi familia por el sacrificio, apoyo y comprensión durante tantos años de estudio:

- A mi madre, María del Carmen Pérez Brunet por su presencia, cariño y enseñanza en todo momento.
- A mi padre, José Manuel Rodríguez Pérez por ser mi ejemplo y más activo formador en la vida.
- A mis abuelos Hector Pérez, Consuelo, Luis Ramón y Agustina, gracias por tanto amor.
- A mis hermanos, Joanna, Yurien y muy especialmente a mi hermano José Manuel, muchas gracias por todo.
- A mis tíos y primos, especialmente a Cecilia Pérez Brunet y Carlos Pérez Melo.
- Al resto de mi familia en Vidalina, Ciudad Habana y Sagua de Tánamo.
- A mi tutor MSc. Antonio Rafael Selva Castañeda compañero y amigo durante largas horas de realización y perfeccionamiento del trabajo.
- A mi novia y mis suegros por quererme y soportarme en los momentos difíciles así como a todas las personas de Melena y Bazán.
- A los excelentes profesores de la Universidad de Oriente, especialmente a los del departamento de Radiocomunicaciones, Janet, Fidel, Enaide y al Dr. Monier.
- A mis queridos amigos y compañeros de estudio, especialmente a Albertico, Eric, Arnaldo, Andrés, Rafael, Karel, Hamlet, Aguilera, Julio y Lalé que durante cinco años han formado parte de mi familia.
- A Margarita Romero, muchas gracias por tanto apoyo y comprensión.
- A las carpenteras, auxiliares y psicopedagogas de la beca así como a todos los educadores desde los niveles primarios de educación hasta el nivel universitario y a todos aquellos que de una forma u otra han aportado a mi formación social y profesional.

## RESUMEN

En este trabajo se analizan los fundamentos teóricos, las características y composición de los sistemas de identificación por radiofrecuencia (RFID) pasivos que operan en la banda de ultra alta frecuencias (UHF) y microondas. Se estudió la metodología de diseño de antenas y superficies selectivas en frecuencia (FSS) para transpondedores de RFID.

Se enfatizó en la necesidad de mejorar el acoplamiento de impedancias entre la antena y el circuito integrado (CI) con el objetivo de mejorar el desempeño del sistema. Para obtener los parámetros que caracterizan la antena y la FSS, se empleó el simulador de estructuras electromagnéticas de altas frecuencias HFSS (High Frequency Structure Simulator) de la compañía Ansys.

Se diseñó una antena lineal serpenteada que opera en la banda de UHF en los 915 MHz y una FSS basada en notación espectral que codifica una cadena de cinco bits en la banda de frecuencias de las microondas entre 2 y 8 GHz.

**Palabras clave:** RFID, transpondedor, circuito integrado, FSS, acoplamiento de impedancias.

## *ABSTRACT*

In this work are analyzed of theoretical basis, characteristics and composition of radio frequency identification systems (RFID) passives that operating in the ultra-high frequency band (UHF) and microwave. The antenna design methodology and frequency selective (FSS) for RFID transponders surfaces are studied.

He emphasized the need to improve impedance matching between the antenna and the integrated circuit (IC) with the aim of improving system performance. For obtaining the parameters that characterizing the antenna and the FSS was used the high frequency electromagnetic structures simulator HFSS of Ansys Company.

Finally was designed one serpentine linear antenna operating in the UHF band in the 915 MHz and FSS that encoding a string of five bits in the spectrum of microwaves frequency band between 2 and 8 GHz.

**Keywords:** RFID, transponder, integrated circuit, FSS, impedance matching.



# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPITULO 1 . SISTEMAS DE IDENTIFICACIÓN POR RADIOFRECUENCIAS. ....	5
1.1 La tecnología de los sistemas de RFID [2]. .....	5
1.2 Factores que afectan la zona de interrogación [4].....	7
1.3 Sistemas pasivos de identificación por radiofrecuencia con CI.....	8
1.3.1 Etiquetas de RFID pasivas con CI. ....	9
1.3.2 Principio de operación de los sistemas con etiquetas pasivas con CI.....	10
1.3.3 Lector del sistema de RFID para etiquetas con CI [2].....	11
1.3.4 Antenas de las etiquetas en el sistema de RFID pasivo. ....	15
1.4 Sistemas de RFID pasivos con etiquetas sin CI. ....	21
1.4.1 Especificaciones para sistemas pasivos con <i>chipless</i> RFID [1].....	21
1.4.2 Clasificación de las etiquetas pasivas sin CI ( <i>chipless</i> RFID) [1]. ....	22
1.4.3 Lector para etiquetas pasivas sin CI [2]. ....	23
1.4.3 Superficies Selectivas en Frecuencia [12]. ....	25
1.4.4 Aspectos importantes de las FSS compuestas por lazos cuadrados resonantes concéntricos [14].....	28
CAPITULO 2 . DISEÑO DE ANTENAS Y FSS PARA ETIQUETAS DE RFID PASIVAS EN LA BANDA DE UHF Y MICROONDAS.....	34
2.1 Técnicas de miniaturización de antenas para etiquetas con CI. ....	34
2.1.1 Antenas de F invertida. ....	35
2.1.2 Antenas de ranura. ....	35
2.1.3 Antenas tipo texto. ....	36
2.1.4 Antenas lineales serpenteadas.....	36
2.2 Técnicas para el acoplamiento de impedancias. ....	38
2.2.1 Acoplamiento de T [23]. ....	38
2.2.2 Acoplamiento Inductivo [24]. ....	40
2.2.3 Aplicación de las Técnicas de Acoplamiento en RFID. ....	42
2.3 Proceso de diseño de antenas para etiquetas pasivas de RFID [25]. ....	43
2.4 Requerimientos de Operación. ....	43
2.4.1 Impedancia del circuito integrado.....	44

2.5	Propuesta de diseño de la antena.....	44
2.5.1	Proceso de simulación. ....	44
2.6	Proceso de optimización. ....	45
2.7	Elementos más utilizados para construcción de FSS [13]. ....	45
2.7.1	Comparación entre elementos. [13].....	46
CAPITULO 3 . DISEÑO DE ANTENAS UTILIZANDO LA TÉCNICA DEL SERPENTE Y FSS COMPUESTAS POR LAZOS CUADRADOS CONCÉNTRICOS.49		
3.1	Requerimientos para la antena lineal serpenteada. ....	49
3.2	Propuesta de Diseño.....	50
3.3	Simulación de la MLA en HFSS.....	50
3.3.1	Resultados de la simulación.....	51
3.4	Proceso de Optimización.....	53
3.4.1	Análisis Paramétrico. ....	53
3.4.2	Optimización.....	54
3.5	Requerimientos para el diseño de la FSS.....	56
3.6	Propuesta de diseño de la FSS. ....	56
3.7	Simulación utilizando el teorema de <i>Floquet</i> [29].....	57
3.8	Proceso de simulación de la FSS [29].....	58
3.9	Resultados de simulación de la FSS.....	58
3.10	Simulación de la estructura finita.....	62
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		65
GLOSARIO DE TÉRMINOS .....		68
ANEXOS .....		69

## INTRODUCCIÓN

La identificación por radiofrecuencia es una tecnología aplicada en la identificación, control y rastreo de objetos, animales y personas. La capacidad de marcar objetos y personas con etiquetas pasivas, permite el desarrollo de las redes de sensores inalámbricos de bajo consumo (WSN) para mejorar la relación costo - potencia efectiva, con indudables beneficios en aplicaciones que van desde la logística hasta la salud, robótica, seguridad, automoción, entre otras.

Un sistema de identificación con tecnología RFID, es un sistema de procesamiento de datos formado por un lector, el medio de transmisión (espacio libre) y una etiqueta o transpondedor compuesto por una antena y un circuito integrado. Los datos codificados se transfieren entre la etiqueta y el dispositivo de lectura/escritura por medio de ondas electromagnéticas en las bandas asignadas, el alcance y la escalabilidad de los sistemas de RFID dependen en gran medida de la frecuencia.

La tecnología de RFID opera en las siguientes bandas de frecuencia: Bajas Frecuencias (LF) de 125 a 134 kHz; Altas Frecuencias (HF) en los 13.56 MHz; Ultra Alta Frecuencia en los 433 MHz y de 860 a 960 MHz; Microondas desde 2.5GHz hasta los 5.8GHz. Los sistemas de RFID que operan en la banda de LF y HF funcionan bajo el principio del acoplamiento electromagnético inductivo (campo cercano) mientras que los sistemas que trabajan en la banda de UHF y Microondas operan bajo el principio de acoplamiento del campo eléctrico (campo lejano).

Las etiquetas que trabajan en la banda de UHF tienen la desventaja de ser influenciadas por las propiedades de los materiales del elemento etiquetado (especialmente graves son los efectos de los metales y materiales con pérdidas), así como por la presencia de objetos en la zona del campo cercano de la propia etiqueta. El diseño de una plataforma para una etiqueta UHF, que sea rentable y de tamaño reducido, es un desafío para los diseñadores de sistemas de RFID. Entre las diversas estrategias de diseño está la del empleo de antenas de microcintas, pues estas permiten garantizar el cumplimiento de los requisitos anteriores.

Los sistemas de RFID de mayor alcance utilizan una etiqueta activa, que contiene una batería para mantener una alimentación continua, por lo que emite constantemente una señal de RF con intervalos cortos de tiempo, esta señal está codificada y contiene la clave de identificación del producto. Al ser alimentada por una batería, esta tiene la ventaja que su circuito integrado puede procesar gran cantidad de información y se puede acompañar de sensores para obtener más información, pero tiene la desventaja que su costo es mayor a 20 dólares estadounidenses.

Los sistemas de RFID para la banda de UHF tienen un alcance entre 3 y 20 metros, utilizan una etiqueta pasiva con circuito integrado y operan en el intervalo de 860 a 960 MHz. La etiqueta normalmente está desactivada, se energiza cuando recibe señal de RF desde un lector, entonces este responde con la información almacenada en su memoria. El alcance de estos sistemas depende de la ganancia de la antena, la sensibilidad del circuito integrado y el acoplamiento antena-CI. La ventaja es que estos sistemas tienen un precio que oscila alrededor de los 0.2 dólares estadounidenses.

Los sistemas de RFID pasivos donde las etiquetas no utilizan circuito integrado proveen una solución de etiquetado a muy bajo costo, pues los transpondedores se fabrican totalmente impresos para proveer al lector el código único de identificación de cada elemento, por lo que son conocidos como *chipless* RFID. La codificación de datos sin utilizar circuito integrado se basa principalmente en el empleo de dos esquemas de codificación: reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) y notación o codificación espectral, por tanto los *chipless* RFID que utilizan ondas de radio se clasifican en dos grupos: basados en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia.

Para interrogar las etiquetas basadas en TDR el lector envía una señal en forma de pulso y escucha los ecos que llegan de regreso desde la etiqueta. Los ecos llegan al lector en forma de un tren de pulsos que puede ser utilizado para codificar los datos. Las etiquetas basadas en notación espectral codifican los datos dentro del espectro utilizando estructuras resonantes. Cada bit de datos se asocia normalmente con la presencia o ausencia de resonancia en una frecuencia predeterminada del espectro. Estas etiquetas tienen la ventaja de ser robustas, totalmente imprimibles y tienen muy bajos costos de producción.

Una de las variantes más utilizadas para la construcción de etiquetas basadas en notación espectral es el empleo de superficies selectivas en frecuencia (FSS). Las FSS son arreglos periódicos de ranuras o elementos conductores que se comportan como

filtros, limitando o permitiendo el paso de la señal de interrogación del lector en las distintas bandas de frecuencia en dependencia de la forma con que fueron construidas, lo que posibilita la codificación del espectro.

Este trabajo presenta el diseño de antenas impresas que emplean la técnica del serpenteo (MLA) para ser utilizadas en sistemas RFID que utilizan etiquetas pasivas con CI que operan en la banda de UHF y una superficie selectiva en frecuencia (FSS) para sistemas pasivos *chipless* RFID; el objetivo principal para el diseño de la MLA es ajustar la impedancia de la antena con el objetivo de lograr máxima transferencia de energía hacia el circuito integrado.

La investigación consta de tres capítulos. El primer capítulo ofrece un marco de referencia que describe los aspectos básicos de dicha tecnología, donde se estudian con mayor profundidad los parámetros más importantes de la antena, el acoplamiento entre esta y el circuito integrado y las principales características de las FSS.

El capítulo 2 presenta el estado del arte en el diseño de antenas y FSS para la construcción de etiquetas pasivas para dispositivos de RFID en la banda microondas y UHF. En este se profundiza en el análisis de las FSS compuestas por lazos cuadrados concéntricos y las antenas diseñadas con la técnica del serpenteo.

El capítulo 3 presenta la propuesta de diseño de una antena impresa que utiliza la técnica del serpenteo y opera en la banda de UHF, entre los 902 y 928 MHz y una FSS que opera en la banda de las microondas (entre 1 y 10 GHz) presentándose el procedimiento para la construcción y simulación de estos dispositivos empleando el simulador electromagnético HFSS.

### **Antecedentes del problema**

Anterior a este trabajo han existido, en la disciplina de Sistemas de Radiocomunicaciones, proyectos que abordan el tema del diseño de antenas y las superficies selectivas (FSS) en frecuencias para diferentes aplicaciones pero ninguno que aborde el diseño de estos dispositivos para los sistemas de identificación por radiofrecuencia (RFID). Este tema tiene hoy día gran importancia tanto para las comunidades científicas como industriales, por las facilidades que ofrece para el control, identificación y rastreo de objetos.

### **Problema a resolver**

Los Sistemas de Identificación por Radiofrecuencia (RFID) pasivos necesitan antenas y superficies selectivas en frecuencia (FSS) que deben tener características, que no se pueden lograr mediante las técnicas convencionales de diseño.

### **Objeto de estudio**

Sistemas de identificación por radiofrecuencia.

### **Objetivos**

Objetivo general

Hacer un estudio de los fundamentos teóricos de los Sistemas de Identificación por Radiofrecuencia (RFID) y realizar el diseño y simulación de una antena y una FSS para dispositivos pasivos de RFID.

Objetivos específicos

1. Llevar a cabo una búsqueda bibliográfica.
2. Realizar un estudio de las técnicas de diseño y simulación de antenas planas y FSS, así como de sus métodos de alimentación.
3. Diseñar una antena utilizando la técnica de serpenteo y una FSS compuestas por celdas con lazos cuadrados concéntricos para dispositivos pasivos de RFID.
4. Obtener los parámetros que caracterizan la antena y la FSS.
5. Comparar los resultados obtenidos con los existentes en publicaciones internacionales.

### **Hipótesis.**

Si se realiza un estudio de los fundamentos teóricos de las antenas y las superficies selectivas en frecuencia para dispositivos pasivos de RFID se tendrá una metodología para el diseño de estas estructuras.

## CAPITULO 1 . SISTEMAS DE IDENTIFICACIÓN POR RADIOFRECUENCIAS.

La identificación por radiofrecuencias es una técnica moderna de transmisión y recepción inalámbrica de datos para aplicaciones que incluyen identificación automática, rastreo y vigilancia. Como los códigos de barra y otras formas de identificación no satisfacen las demandas actuales, esta tecnología resulta atractiva para múltiples aplicaciones, como logística, manejo de las cadenas de suministro, seguridad, supervisión, control de acceso y muchas otras. El objetivo principal de un sistema de RFID es permitir la realización de operaciones precisas y el fácil manejo de los procesos comerciales, para de esta forma incrementar la eficiencia en la supervisión y mejorar el análisis de control de calidad y falla, reduciendo la pérdida de artículos e incrementando la ganancia del negocio [1].

### 1.1 La tecnología de los sistemas de RFID [2].

La tecnología de RFID constituye una herramienta de almacenamiento o recuperación remota de datos. Esta tecnología sustituye el código de barras en el control de inventario y seguimiento de procesos industriales pues a diferencia de estos, un sistema de RFID no requiere una línea de visibilidad directa para obtener resultados precisos [3].

En la figura 1.1 se muestra la estructura de un sistema de RFID, el que se divide en dos capas: capa física y capa de tecnología de la información (IT). La capa física está compuesta por la etiqueta, el lector /interrogador y la zona de interrogación (IZ).

**La etiqueta (Tag).** Se adhieren al artículo y almacenan la identificación única del producto, son conocidas también como transpondedor y están compuestas por una antena y un circuito integrado o una superficie selectiva en frecuencia (*chipless RFID*). La antena de la etiqueta se comunica con el lector por medio de ondas electromagnéticas y pueden fabricarse de aluminio, cobre u otros materiales, siendo creadas por técnicas de deposición de materiales similares a la inyección de tinta sobre una hoja. La cantidad de material conductor utilizado y el tamaño de la antena determinan la sensibilidad de la etiqueta, aspecto crucial para obtener buenos rangos de lectura y minimizar la influencia de los materiales sobre los que son aplicados los transpondedores [4].

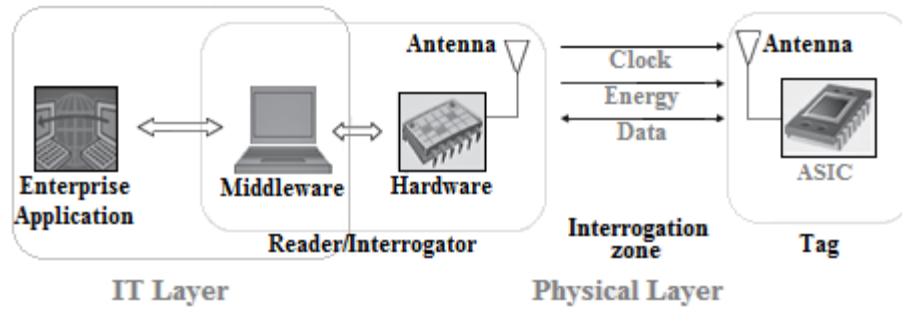


Fig. 1.1. Sistema de RFID genérico.

**Lector /interrogador.** Realiza una función similar al escáner utilizado para códigos de barras ópticos. Pueden ser fijos o portátiles y están compuestos principalmente por dos componentes: la antena y el circuito interrogador. La antena permite la comunicación con la etiqueta empleando ondas electromagnéticas, para etiquetas pasivas con CI, esta provee la potencia necesaria para la operación del elemento activo. El circuito interrogador es un intermediario entre la antena del lector y la capa IT y realiza la tarea de enviar los datos a través de la antena, recibir la respuesta de la etiqueta y luego enviarla a la capa IT para que la información sea procesada, este también realiza la tarea de coordinación entre las distintas antenas del lector para que la lectura sea eficiente.

**Zona de lectura.** Comprende el área donde el lector puede enviar o recibir datos desde una etiqueta RFID. Es el espacio físico tridimensional comprendido entre la etiqueta y el lector. Se incluye en la capa física porque la comunicación entre la etiqueta y el lector depende en gran medida de las interferencias de otras fuentes electromagnéticas, reflexión de ondas y la presencia de objetos móviles o estacionarios en esta zona.

La capa de tecnología de la información está compuesta por el de *Middleware* y el Módulo de Aplicaciones de la Empresa.

**El software personalizado (*Middleware*).** Es el intermediario entre el interrogador y el módulo de aplicaciones de la empresa, envía y recolecta datos directamente del interrogador, realiza un proceso de conteo comercial observando y almacenando los datos, para enviarlo por solicitud, al módulo de aplicación de la empresa. Además, provee el programa utilizado para supervisar, configurar y manejar el hardware del interrogador.

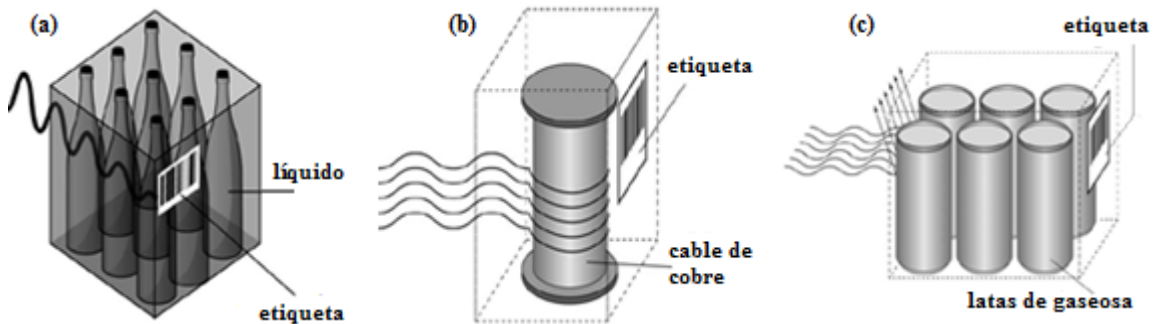
**El módulo de aplicación de la empresa.** Utiliza los datos del *Middleware* y realiza los procesos pertinentes al negocio como la creación de las facturas en los formatos requeridos.



## 1.2 Factores que afectan la zona de interrogación [4].

Las etiquetas pasivas de RFID son una tecnología novedosa en comparación con la tecnología de los códigos de barra. En la actualidad, existen relativamente pocas implementaciones en la cadena de abastecimiento y pocos proveedores con experiencia real en el campo. Cada instalación tiene sus propias características, esto hace que el diseño de cada una, sea más un arte que una ciencia.

**Absorción:** Los envases que contienen líquidos (alimentos y bebidas, por ejemplo) absorben las ondas de RF en UHF. La absorción atenúa o debilita el campo electromagnético propagado desde una antena del lector o de regreso desde la antena de la etiqueta. La absorción varía de acuerdo al tipo de sustancia y con la frecuencia de la señal. Es posible calcular el grado de absorción de varias sustancias en determinadas frecuencias y se han hecho estudios donde se ha demostrado que las etiquetas posicionadas en el espacio de aire justo debajo de la tapa de las botellas, como se muestra en la figura 1.2a, reducirán la absorción.



**Fig. 1.2.** a) Absorción por líquidos. b) Bloqueo por bobinas de cables. c) Reflexión sobre el metal

**Interferencias:** Algunos materiales ofrecen poca interferencia a la energía de radiofrecuencia (RF) que pasa a través de ellos. La ropa hecha con fibras orgánicas y sintéticas, productos de papel, madera, plástico no conductor y cartón son algunos ejemplos. Los embalajes de papel con cubiertas de metal, por el contrario, reflejarán las ondas de radio.

**Revestimiento:** Los cables y láminas finas de metal pueden actuar como una espiral de inducción, como se muestra en la figura 1.2b, donde se crea un campo opuesto que debilita la señal que viaja desde el lector. Algunos materiales ofrecen gran resistencia al paso de las ondas electromagnéticas mientras otros no las afectan, por ejemplo, el metal

de las latas de gaseosa dificulta la propagación de las ondas de RF hacia la etiqueta como se muestra en la figura 1.2c mientras el plástico de las botellas de aceite y el aceite ofrecen poca resistencia al paso de estas.

**Desintonización:** Las antenas de las etiquetas son afectadas por sus alrededores inmediatos. Una transpondedor aplicado a una caja de gaseosas, por ejemplo, será más afectado por su ubicación (parte superior o inferior de la caja) que cualquier otro. La absorción y el revestimiento de las latas atenúan la densidad de energía que llega a la etiqueta y afecta la señal de retorno al lector. Las etiquetas ubicadas demasiado cerca pueden unirse unas a otras, desintonizando sus antenas. El metal en las cintas transportadoras, auto-elevadores y otros equipamientos manuales también pueden desintonizar, bloquear y reflejar señales.

**Refracción:** En UHF, la refracción es posiblemente el problema más importante para los sistemas de RFID. Por refracción se entienden los fenómenos que se producen durante la propagación de ondas en medios no homogéneos y que puede ser interpretado como la desviación de los haces. El concepto de refracción se refiere al dominio de la óptica geométrica, por ejemplo los metales refractan casi todas las señales de radio y algunos tipos de láminas de plástico, vidrios y materiales de construcción también afectan las ondas de RF.

**Zonas Muertas:** La interferencia crea las llamadas “zonas muertas” debido a las características del ambiente. Los sistemas de radio, computadoras y teléfonos pueden crear interferencias, sin embargo el protocolo inalámbrico que emplea el lector reduce considerablemente este tipo de afectación. La descarga electrostática de materiales que acumulan electricidad estática y no están instalados a tierra, también puede crear interferencia. La señal del lector puede interferirse a sí misma debido a múltiples reflexiones desde otras superficies. Un ejemplo, es el caso de una señal que rebota en un objeto de metal y alcanza una etiqueta en forma simultánea.

### **1.3 Sistemas pasivos de identificación por radiofrecuencia con CI.**

En un sistema de RFID que opera en la banda UHF cuando el lector emite señales a través de sus antenas y una etiqueta (compuesta por una antena y un circuito integrado de aplicación específica (ASIC)) se encuentra dentro de la zona de lectura, esta se energiza, siendo interrogada la información que posee. La señal de consulta desde el

lector debe tener suficiente energía para activar la etiqueta, realizar el procesamiento de datos y transmitir una cadena modulada sobre una distancia de lectura requerida.

### 1.3.1 Etiquetas de RFID pasivas con CI.

La norma ISO/IEC 19762-3 define la etiqueta pasiva como “un dispositivo que refleja la señal portadora proveniente del lector”, este tipo de dispositivo no tiene fuente de alimentación, obteniendo la energía de la señal de RF que envía el lector. Estas utilizan la energía que envía el lector para activar el CI, el que almacena la identificación única del producto; además de manejar la conversión de energía, control lógico, almacenamiento, recuperación de datos y la modulación requerida para enviar los datos al lector [4].

La tabla 1.1 muestra una comparación entre los parámetros más importantes de las etiquetas de RFID activas y pasivas. Los beneficios de no tener batería resaltan en el precio y vida útil; pero las desventajas, en su campo de operación y su capacidad de memoria.

**Tabla 1.1.** Comparación entre etiquetas activas y pasivas [5].

Parámetros	Pasivas con CI	Pasivas sin CI	Activas
<b>Fuente de alimentación</b>	Señal de RF del lector.	Señal de RF del lector	Interna de la etiqueta
<b>Batería</b>	No	No	Si
<b>Costo</b>	0,20 a 0,50 dólares	0,20 a 0,50 dólares	Más de 20 dólares
<b>Vida útil</b>	Más de 20 años	Más de 20 años	De 2 a 5 años
<b>Campo de operación</b>	10cm a 20m	10cm a más 20m	De 100 a 225 m
<b>Almacenamiento de datos</b>	Hasta 35 bits	128 bytes de Lectura/Escritura	Más de 128kb de Lectura/Escritura

Los elementos que componen una etiqueta pasiva con circuito integrado se muestran en la figura 1.3. El CI tiene una memoria ROM (*Read-Only Memory*) donde almacena el código único de identificación del artículo, este se envía al lector para que identifique la etiqueta [6]. Cuando la antena recibe la señal enviada por el lector responde con la información almacenada en memoria.

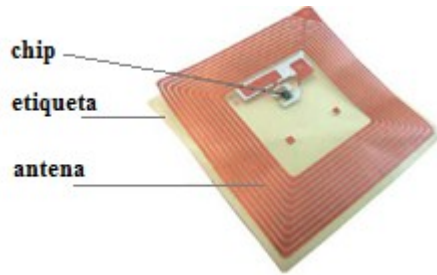


Fig. 1.3. Composición de una etiqueta pasiva con CI de RFID.

### 1.3.2 Principio de operación de los sistemas con etiquetas pasivas con CI.

Las etiquetas pasivas de RFID en la banda de UHF trabajan en la zona de los campos lejanos y operan utilizando el principio de retro esparcimiento a través de la modulación de la señal radiada [7]. La figura 1.4 muestra un esquema que describe el funcionamiento de un sistema de RFID pasivo. El lector envía una señal con determinada potencia que incide sobre la antena de la etiqueta, produciendo una diferencia de potencial entre los terminales. El transpondedor modula la señal de respuesta a través del acople y desacople de la impedancia del circuito integrado, esto genera variaciones en la potencia de la señal radiada y provee el código de identificación de la etiqueta.

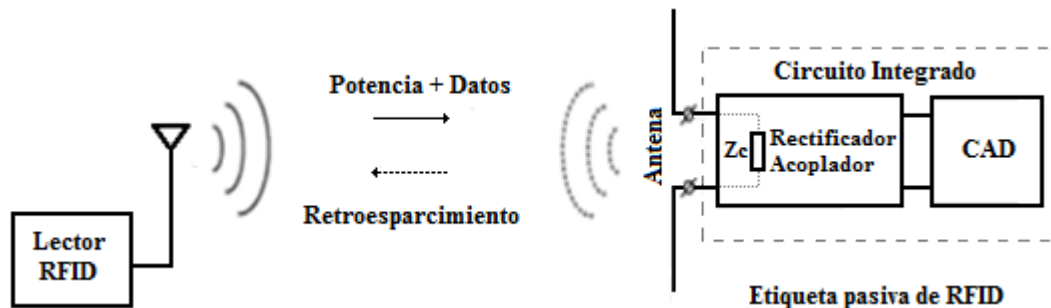


Fig. 1.4. Esquema del principio de operación de un sistema RFID con etiqueta pasiva.

El intercambio de datos entre la etiqueta y el lector puede emplear diferentes tipos de modulación y codificación, la figura 1.5 muestra un ejemplo donde en el intervalo de tiempo de una trama se tiene una onda continua (CW), una señal modulada (solicitud de respuesta) y la señal de retorno desde el transpondedor generada por la variación de la energía de la onda reflejada hacia el lector.

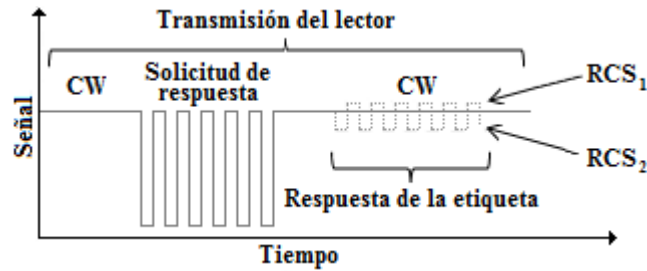


Fig. 1.5. Intercambio de datos entre la etiqueta y el lector.

### 1.3.3 Lector del sistema de RFID para etiquetas con CI [2].

Los lectores RFID están compuestos por un sistema de antenas inteligentes, unidades de procesamiento digital de señales y un sistema con *middleware* y funciones de enrutamiento. Estas características permiten la fácil integración de los mismos dentro de las redes de datos, cumpliendo con los protocolos de comunicación estandarizados.

La figura 1.6 muestra como se establece el flujo de datos en estos sistemas, este se organiza utilizando una estructura maestro-esclavo, donde el lector actúa como maestro para las etiquetas, pero al mismo tiempo está en posición de esclavo pues la aplicación de software o *middleware* que procesa los datos provenientes del interrogador, actúa como unidad maestra y envía comandos a este.

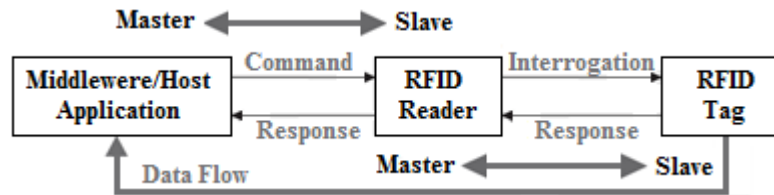


Fig. 1.6. Modelo maestro-esclavo.

En la figura 1.7 se muestra el esquema en bloques de un lector, como se puede apreciar este está compuesto por tres partes principales: sección de control, interfaz de alta frecuencia y la antena.

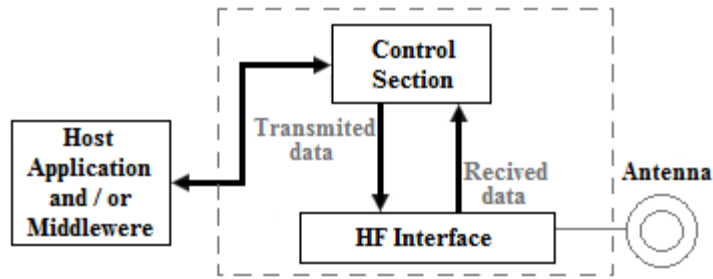


Fig. 1.7. Diagrama en bloques de un lector RFID.

La figura 1.8 muestra el diagrama en bloques de la sección de control del lector, donde se realiza la mayor parte del procesamiento digital de los datos recibidos desde el transpondedor.

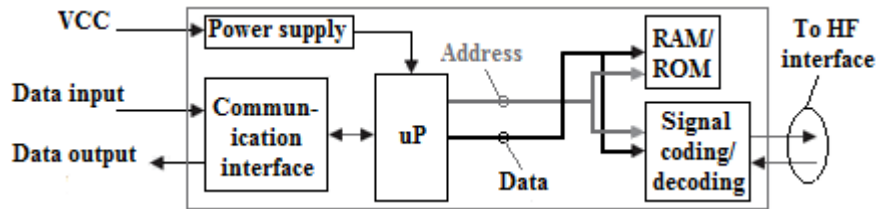


Fig. 1.8. Diagrama en bloques de la sección de control.

Esta posibilita la comunicación inalámbrica con la etiqueta realizando modulación, procedimientos anti-colisión y decodificación de los datos de respuesta de la etiqueta. Estos datos se emplean para interrogar las etiquetas o para reprogramarlas. Esta sección está compuesta por un microprocesador, un bloque de memoria, un convertor analógico/digital y un bloque de comunicación con el programa de aplicación.

La figura 1.9 muestra el módulo de la interfaz de RF, este se utiliza para la transmisión y recepción de la señal y está compuesto por dos caminos separados para los dos flujos direccionales de datos desde y hacia el transpondedor.

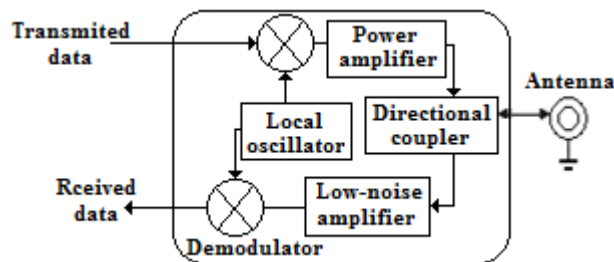
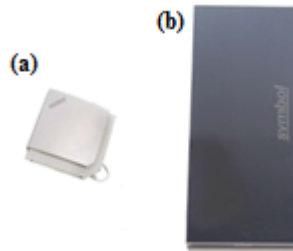


Fig. 1.9. Diagrama en bloques de la sección de RF de un lector RFID.

El oscilador local genera la señal portadora a la frecuencia de operación del sistema, la que se emplea para modular la señal de datos que se desea transmitir, que luego se amplifica y transmite a través de la antena. Un acoplador direccional separa la parte de transmisión y la de recepción de la señal que llega de retorno desde la etiqueta, la señal recibida desde el transpondedor es débil, por lo que un amplificador de bajo ruido incrementa la amplitud de la señal para que después sea decodificada en el demodulador. Para decodificar los datos recibidos desde el transpondedor se emplean diferentes técnicas de demodulación, aunque la mayoría emplean la modulación digital de fase binaria (BPSK) y modulación digital de amplitud (ASK).

### 1.3.3.1 Antenas del lector de RFID para etiquetas con CI [4].

La antena del lector es el componente más sensible de un sistema RFID, en la figura 1.10 se muestran diferentes ejemplos de antenas empleadas en estos sistemas y en la figura 1.11 se muestra una instalación típica de antenas, para una línea de empaque y para un portal. La mayoría de estas antenas están alojadas en recintos que son fáciles de montar como en armarios protegidos, al variar la ubicación de la misma se puede ajustar el sistema, sin embargo esta es una de las tareas más difíciles de realizar.



**Fig. 1.10.** Ejemplos de antenas del lector. a) Antena Symbol Direccional Dual. b) Antena Industrial Symbol de alto desempeño.

La antena del lector se coloca en una posición donde la transmisión de energía hacia la etiqueta y la recepción de los datos sean buenos. El nivel de potencia máximo que puede emitir un lector está limitado por regulaciones gubernamentales, por tanto la ubicación de las antenas es vital para la realización de lecturas precisas.

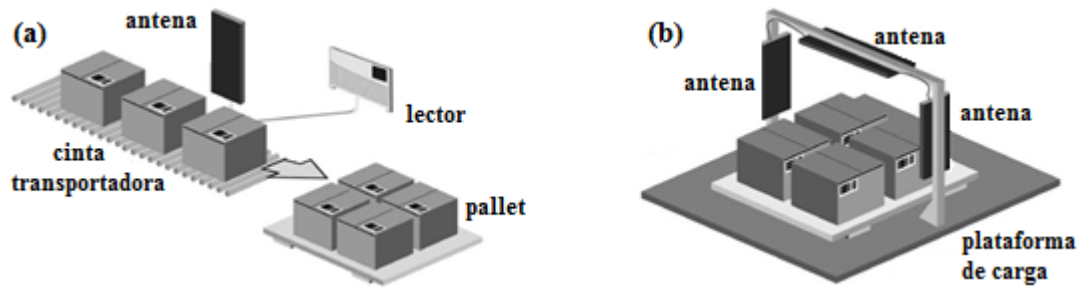


Fig. 1.11. Configuración de antenas del lector. a) Cinta transportadora. b) Portal.

Existen tres características de las antenas que contribuyen a la legibilidad de la etiqueta.

**Patrón:** Es la distribución tridimensional de la energía que radia la antena, también conocido como el área de lectura.

**Ganancia y atenuación:** La ganancia de la antena de un lector se fija en relación a las regulaciones gubernamentales. No obstante, la señal puede reducirse o atenuarse para limitar el rango de lectura de la etiqueta o para dirigirla sólo a las etiquetas que se desean interrogar.

**Polarización:** Es la orientación de la transmisión del campo electromagnético. En general las antenas con polarización lineal como la presentada en la figura 1.12a, proveen un rango de lectura más extenso y se emplean en sistemas de lectura automática que utilizan cinta transportadora, pero son más sensibles a la orientación de la etiqueta.

La polarización circular se emplea en antenas diseñadas para radiar en diferentes direcciones simultáneamente como se observa en la figura 1.12b. Una antena con polarización circular ofrece mayor tolerancia a distintas orientaciones de la etiqueta y un mejor desempeño en cuanto a eficiencia en las lecturas frente a obstrucciones. Estas virtudes implican, a su vez, la reducción del rango y el foco de lectura.

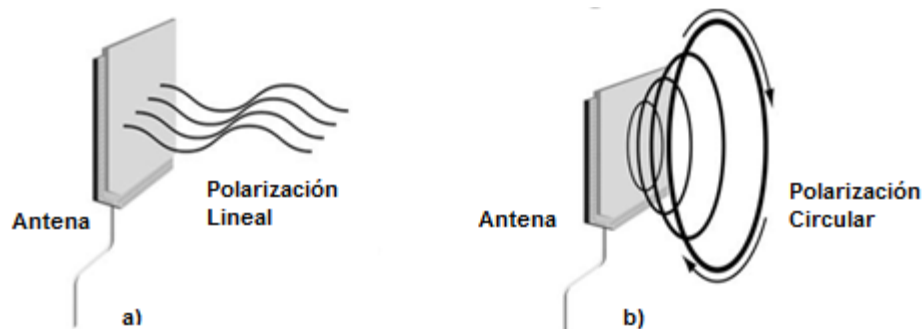


Fig. 1.12. Polarización de la antena. a) Lineal. b) Circular.



### 1.3.4 Antenas de las etiquetas en el sistema de RFID pasivo.

El diseño de una antena para etiquetas pasivas está relacionado con la aplicación, por ejemplo: el tipo de material al cual se adherirá, las dimensiones del objeto que se desea identificar y la frecuencia de operación. Estas pueden ser: delgadas, flexibles, con una impedancia estable en el rango de operación, tamaño reducido respecto a la longitud de onda, entre otras [4].

#### 1.3.4.1 Ubicación de las etiquetas [4].

La ubicación y orientación de una etiqueta dentro del sistema es un aspecto crítico. La composición del producto, la geometría del embalaje, los materiales contenidos en el mismo, la carga de pallets y la proximidad y orientación con respecto a la antena del lector son variables que se deben tener en cuenta. A modo de ejemplo cabe destacar que en aplicaciones piloto con artículos que contienen líquidos, una variación mínima de la ubicación de la etiqueta puede afectar significativamente la realización de la lectura.

**Posicionamiento de la Etiqueta:** La etiqueta debe encontrarse en el mismo plano de la antena al pasar a través de la ventana de lectura, es decir, la antena y el lector deben estar ubicados de forma paralela, como se muestra en la figura 1.13. Sin embargo, esto resulta impráctico e inconsistente con las exigencias actuales, donde se requiere que una caja se pueda leer independientemente de la posición del lado etiquetado.

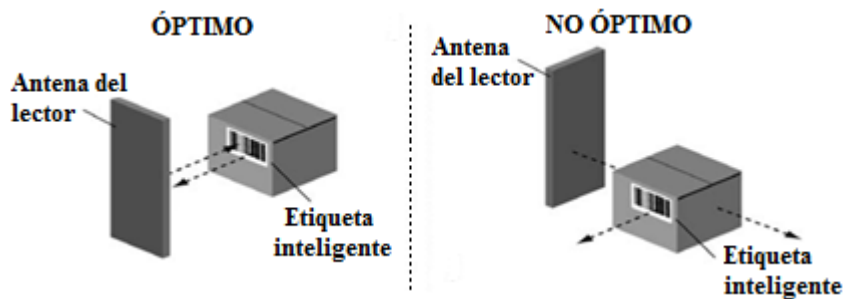


Fig. 1.13. Ubicación adecuada de la etiqueta pasiva de RFID.

La ubicación de la caja y la orientación de la antena del transpondedor se toman en cuenta para asegurar la realización de una lectura exitosa, como se muestra en la figura 1.14. En aquellas aplicaciones donde la orientación de las cajas es impredecible, una etiqueta que utilice una antena con polarización circular tendrá mayor eficiencia en la realización de la lectura.

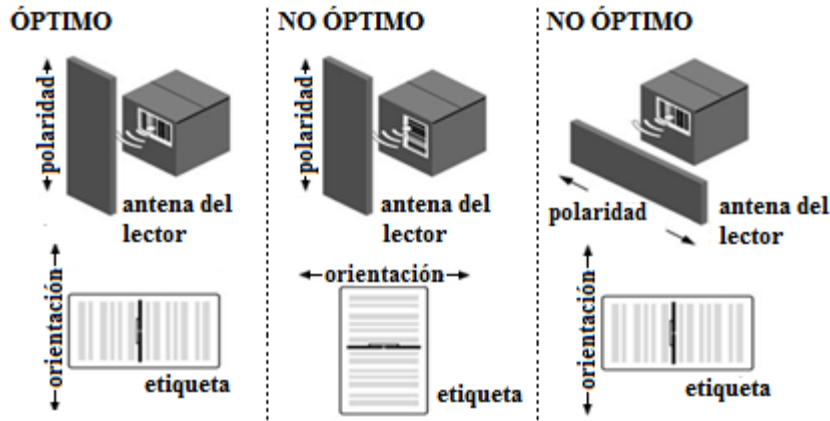


Fig. 1.14. Orientación adecuada de la antena de la etiqueta pasiva de RFID.

Las etiquetas ubicadas en la cercanía de objetos metálicos, como latas de aluminio o láminas de metal, inutilizan la acción de la antena. Es por ello que es necesario escoger el tipo de etiqueta y su ubicación de forma apropiada, aunque en la actualidad existen algunos sustratos para el diseño de antenas que reducen los efectos del embalaje y las láminas de metal.

### 1.3.4.2 Parámetros importantes de las antenas para etiquetas de RFID pasivas con CI.

En el diseño de antenas para etiquetas pasivas el aspecto fundamental es la cobertura que estas pueden brindar, que depende de la distancia máxima de lectura, la ganancia y el acoplamiento de impedancias entre la antena y el circuito integrado.

**Distancia máxima de lectura.** La distancia máxima de lectura se puede calcular por la ecuación de Friis para el espacio libre [8].

$$r = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \tau}{P_{CI}}} \quad (1.1)$$

Donde:

$r$ : Distancia máxima de lectura [m],

$\lambda$ : Longitud de onda [m],

$G_r$ : Ganancia de la antena de la etiqueta [adimensional],

$P_{CI}$ : Sensibilidad del circuito integrado [W].

$\tau$ : Coeficiente de transmisión de energía [adimensional].

$$P_t G_t = \text{PIRE}$$

Donde:

$P_t$ : Potencia (W) y

$G_t$ : Ganancia de la antena del lector [adimensional].

El coeficiente de transferencia de energía se puede calcular si se utiliza la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{4R_c R_a}{|Z_c + Z_a|^2} \quad (1.2)$$

Donde:

$Z_c = R_c + jX_c$  Impedancia del circuito de entrada de la etiqueta [ $\Omega$ ] y

$Z_a = R_a + jX_a$  Impedancia de la antena de la etiqueta [ $\Omega$ ].

La potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE) que emite el lector se especifica en las normas locales o nacionales, por ejemplo en México se tiene la NOM-121 que es una norma oficial de la comisión federal mexicana de telecomunicaciones donde se especifica 4W o 36 dBm de potencia PIRE para la banda de frecuencia donde operan los sistemas RFID pasivos (902-928 MHz). Esta potencia es un punto de referencia importante para determinar la ganancia de la antena a una determinada distancia con un coeficiente de transferencia de energía menor o igual a uno.

**Ganancia.** La ganancia es un parámetro secundario de las antenas pues depende del patrón de radiación, esta ofrece una medida de cuántas veces una antena concentra mayor densidad de energía en una dirección, respecto a una antena de prueba cuando ambas se alimentan con la misma potencia y se define como una razón de la intensidad de radiación en una dirección dada respecto a la intensidad de radiación generada por una antena patrón.

Para el caso de los sistemas RFID pasivos, si se conoce la potencia de transmisión del lector, el campo de lectura máximo está limitado por la ganancia de la antena del transpondedor y la frecuencia de operación. Si la energía de RF que recibe la etiqueta puede ser re-radiada, la densidad de potencia que se recibe ( $S_{RXTag}$ ) en la etiqueta situada a una distancia  $R$  se puede calcular por:

$$S_{RXTag} = \frac{G_{Lector} P_{TXLector}}{4\pi R^2} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (1.3)$$

La potencia recibida por la etiqueta se determina por:

$$P_{RXTag} = S_{RXTag} A_{Tag} \quad [W] \quad (1.4)$$

Donde  $A_{Tag}$  es la apertura equivalente de la antena y se calcula por:

$$A_{Tag} = \frac{G_{Tag} \lambda^2}{4\pi} [m^2] \quad (1.5)$$

Donde:

$G_{Tag}$ : Ganancia de la etiqueta y

$\lambda$ : Longitud de onda.

Si se trabaja en las ecuaciones 1.3, 1.4 y 1.5 se determina que la potencia recibida por la etiqueta se calcula empleando la siguiente ecuación:

$$P_{RXTag} = \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_{Lector} * G_{Tag} * P_{TXLector} \quad [W] \quad (1.6)$$

Donde:

$P_{RXTag}$ : Potencia que recibe la antena,

$P_{TXLector}$ : Potencia transmitida por el lector y

$G_{Lector}$ : Ganancia del lector.

La densidad de potencia que recibe el lector cuando la etiqueta responde se calcula por:

$$S_{RX Lector}^{Ret} = \frac{G_{Tag} P_{RXTag}}{4\pi R^2} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (1.7)$$

Donde:

R: distancia entre la etiqueta y el lector.

Entonces la potencia que recibe el lector se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$P_{RX Lector}^{Ret} = S_{RX Lector}^{Ret} A_{Lector} = S_{RX Lector}^{Ret} G_{Lector} \frac{\lambda^2}{4\pi} [W] \quad (1.8)$$

Si se sustituye la ecuación 1.7 en 1.8 se obtendrá la siguiente expresión:

$$P_{RX\ Lector}^{Ret} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^4 G_{Tag}^2 G_{Lector}^2 P_{TX\ Lector} \quad [W] \quad (1.9)$$

Como se conoce la potencia  $P_{PIRE} = G_{Lector} P_{TX\ Lector}$ , la potencia en el lector cuando una etiqueta responde se calcula por:

$$P_{RX\ Lector}^{Ret} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^4 G_{Tag}^2 G_{Lector} P_{PIRE} \quad [W] \quad (1.10)$$

Si se analiza la ecuación 1.10 se observa que 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.

**Acoplamiento de impedancias.** El acoplamiento de impedancias determina la máxima transferencia de potencia entre la antena y el circuito integrado en la etiqueta de RFID pasiva. La figura 1.15a muestra el circuito equivalente que representa acoplamiento en un transpondedor. La impedancia del circuito integrado es un dato que brinda el fabricante en las cartas técnicas. La figura 1.15b muestra cuatro tipos de CI para la tecnología pasiva, donde se especifican el fabricante y la impedancia del mismo. Estos circuitos se seleccionan por tener el mismo protocolo de comunicación de acuerdo a la norma ISO-180006C [9][15] o la IEPG Global [10].

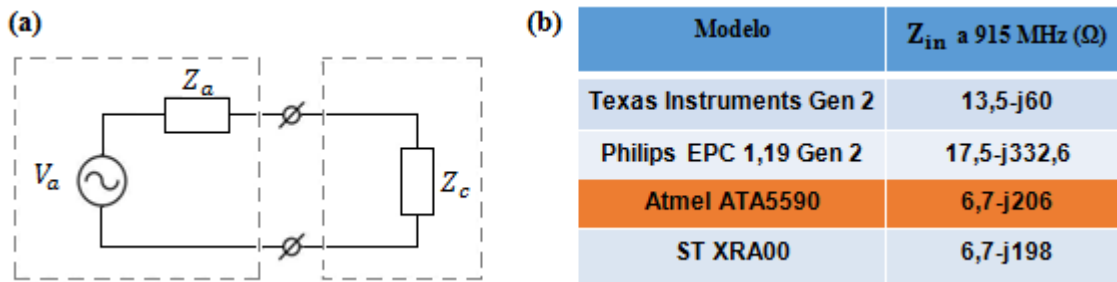


Fig. 1.15. Acoplamiento de impedancias, circuito equivalente. b) CI para etiquetas de RFID pasivas.

En el circuito equivalente de la figura 1.15a,  $Z_c = R_c + jX_c$  ( $\Omega$ ) es la impedancia de entrada del CI y  $Z_a = R_a + jX_a$  ( $\Omega$ ) es la impedancia de la antena de la etiqueta. La potencia disponible ( $P_c$ ) que se transfiere al circuito integrado a través de la antena se puede calcular mediante la ecuación 1.11

$$P_c = P_a \tau \quad [W] \quad (1.11)$$

Donde  $P_a$  es la potencia disponible en la antena y  $\tau$  el coeficiente de transferencia de energía.

En la figura 1.16a se realiza un análisis del comportamiento de la impedancia en un dispositivo de RFID pasivo y la respuesta de la etiqueta en función de la frecuencia. La resonancia de esta última ocurre cuando su impedancia es resistiva pura, es decir, cuando el valor modular de la reactivancia del CI es igual al de la antena. La figura 1.16b muestra un análisis de ganancia, acoplamiento de impedancias y distancia de lectura, para el circuito integrado Atmel ATA5590, cuya sensibilidad es -19.21 dBm [11], en este caso se considera que la potencia PIRE es de 4W o 36 dBm y la gráfica se obtiene de variar la ganancia de la antena entre 0 y 2 dB y el coeficiente de transferencia de energía de 0 a 1, el máximo rango de lectura se obtiene cuando ocurre la máxima transferencia de energía en combinación con la máxima ganancia (2 dB). Para ganancias menores aunque el acoplamiento sea máximo la distancia disminuye pero la máxima cobertura siempre se obtiene con un coeficiente de transferencia de energía se aproxima al valor ideal.

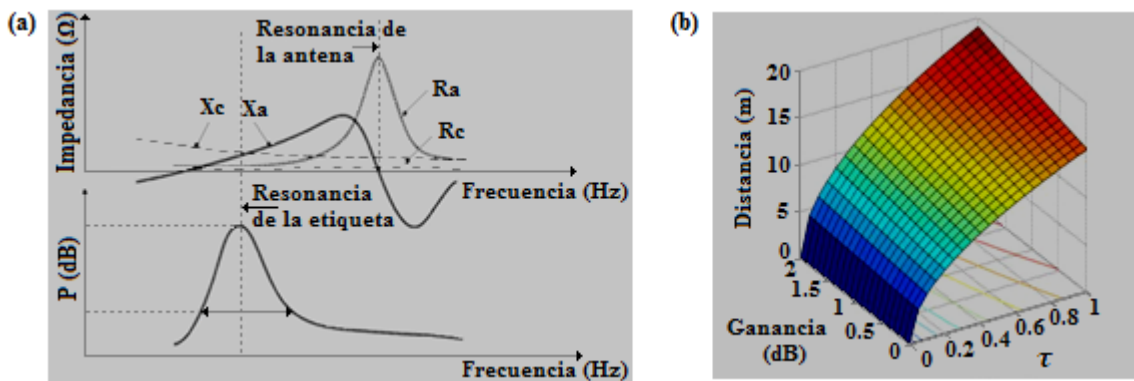


Fig. 1.16 a) Impedancia de la antena y el CI y ancho de banda de operación de la etiqueta. b) Relación ganancia-coeficiente de transferencia de energía, en el campo de lectura.

## 1.4 Sistemas de RFID pasivos con etiquetas sin CI.

Las etiquetas pasiva de RFID sin CI (*chipless RFID tag*) proporcionan una solución prometedora para el etiquetado de elementos con costos muy bajos, pues los transpondedores se fabrican totalmente impresos y sin circuito integrado. La codificación de datos sin CI se realiza por dos esquemas de codificación: reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) y notación o sintonía espectral, por tanto los *chipless* RFID que utilizan ondas de radio se clasifican en dos grupos: basados en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia [1].

### 1.4.1 Especificaciones para sistemas pasivos con *chipless* RFID [1].

Estos requerimientos están determinados en gran medida por la aplicación del sistema.

**Costo.** El costo del sistema depende en gran medida del costo de los transpondedores. Las etiquetas pasivas de RFID necesitan tener costos de producción muy bajos (preferiblemente inferior a 1 centavo para ser costeable al etiquetar elementos de papel o plástico). Esto introduce restricciones en el diseño de las mismas y la selección del material para su construcción. Los conductores y dieléctricos típicos empleados son aluminio, cobre, tinta conductora y polyester o placas de circuito impreso (PCB) respectivamente.

**Tamaño.** El tamaño de los transpondedores depende de la frecuencia de operación y del tamaño del elemento a etiquetar; debe ser de varios centímetros hasta aproximadamente 1 decímetro.

**Banda de frecuencias.** La banda de frecuencias de operación determina directamente la cantidad de bits que pueden utilizarse para la codificación. Por ejemplo podría escogerse un sistema de banda ultra ancha (UWB), que tiene una banda de trabajo que va desde los 3.1 a los 10.7 GHz en EE.UU pero estos sistemas están restringidos por la cantidad de potencia PIRE que pueden radiar, que debe ser inferior a -40dBm en exteriores y -50 dBm en interiores.

**Rango de lectura.** El rango mínimo de lectura requerido lo define la sensibilidad del lector, esto se debe completamente al hecho de que los *chipless* RFID no necesitan batería para su operación. Las principales limitaciones en el rango de lectura se producen por el bajo nivel de la potencia PIRE y la orientación.

**Aplicación con movilidad.** El sistema RFID pasivo está dirigido a aplicaciones de cinta transportadora con velocidades de 10 m/s. El efecto Doppler, en este caso, a 10.7 GHz (el peor de los casos para sistemas UWB) es menor de 400 Hz y no afecta la operación de las etiquetas. Sin embargo los transpondedores pasan menos tiempo en la zona de interrogación, pero como estos no se comunican con sus lectores utilizando sincronización, este aspecto no presenta mayores consecuencias.

**Confiabilidad.** Los transpondedores RFID deben soportar variaciones de calor, humedad, procesos de impresión, inserción y laminación de la etiqueta. Se ha probado que la tinta conductora es extremadamente robusta manteniendo esta característica cuando se imprime sobre sustratos flexibles, necesario para aplicaciones como etiquetado de sobres o facturas.

**Seguridad.** Los sistemas de RFID pasivos proveen una capa extra de seguridad contra falsificaciones si se emplean tintas conductoras transparentes. Aunque presentan el inconveniente que es imposible leer múltiples etiquetas apiladas, debido al acoplamiento mutuo entre estas y la incapacidad de diferenciar entre etiquetas o determinar el número de transpondedores.

#### 1.4.2 Clasificación de las etiquetas pasivas sin CI (*chipless* RFID) [1].

**Etiquetas basadas en TDR.** Para interrogar estas etiquetas el lector envía una señal en forma de pulso y escucha los ecos que llegan de regreso desde la etiqueta. Los ecos llegan al lector en forma de un tren de pulsos que puede ser utilizado para codificar los datos. Las etiquetas de RFID que emplean esta técnica de codificación de datos se pueden clasificar en etiquetas imprimibles y no imprimibles.

El transpondedor basado en ondas acústicas de superficie (SAW) desarrollado por la corporación RFSAW es un ejemplo de etiquetas no imprimibles basada en TDR. Este se excita con un pulso gaussiano que envía el lector, centrado en 2.5 GHz. El pulso interrogador es convertido en una SAW utilizando un transductor interdigital (IDT). La SAW se propaga a través del cristal piezoeléctrico siendo reflejada por un grupo de reflectores, creando así, un tren de pulsos con variaciones de fase. El tren de pulsos se convierte de retorno en una onda electromagnética utilizando el IDT, siendo finalmente detectado por el lector, donde se decodifica el identificador de la etiqueta.

Los transpondedores SAW son funcionales y bien podrían reemplazar las etiquetas con CI, sin embargo, estos no ofrecen una solución totalmente imprimible debido a su naturaleza



piezoeléctrica, esta característica impide que se puedan emplear en billetes bancarios, sellos de correo u otros elementos hechos de papel o plástico.

**Etiquetas basadas en notación espectral.** Codifican los datos dentro del espectro utilizando estructuras resonantes. Cada bit de datos se asocia normalmente con la presencia o ausencia de resonancia a una frecuencia predeterminada en el espectro. Estas etiquetas tienen la ventaja de ser robustas y totalmente imprimibles, presentan grandes potencialidades para el almacenamiento de datos y muy bajos costos de producción. El inconveniente de estas etiquetas es que necesitan gran parte del espectro para la codificación de los datos y un amplio ancho de banda dedicado al lector. Se pueden distinguir dos tipos de etiquetas basadas en notación espectral teniendo en cuenta su naturaleza: etiquetas químicas y etiquetas de circuitos planos.

**Etiquetas pasivas con circuitos planos.** Se construyen utilizando estructuras resonantes y pueden estar compuestas por antenas y filtros. Se imprimen sobre láminas delgadas y flexibles de sustratos polímeros. La etiqueta pasiva puede estar constituida por un grupo de antenas dipolo, con resonancias a diferentes frecuencias. Cuando esta es interrogada por una señal que explora las frecuencias, el lector observa disminuciones de amplitud en el espectro como consecuencia de los dipolos. Cada dipolo tiene una correspondencia 1:1 con los bits de datos. Los aspectos claves en relación a esta tecnología son: el tamaño de la etiqueta (a menor frecuencia mayor longitud de onda del medio dipolo) y el efecto de acoplamiento mutuo entre los elementos.

### 1.4.3 Lector para etiquetas pasivas sin CI [2].

Las etiquetas pasivas de RFID sin CI exigieron el desarrollo de un nuevo lector. Las principales diferencias entre el lector desarrollado para *chipless* RFID y el lector convencional disponible en el mercado, son las siguientes:

- Los lectores convencionales operan mayormente en la bandas de HF (13.56 MHz), UHF (915 MHz) y de microondas (2.45 GHz), mientras el lector para *chipless* RFID opera fuera de estas bandas.
- Los lectores convencionales utilizan modulación ASK y BPSK, mientras el lector presentado descifra la etiqueta realizando una búsqueda en el espectro de frecuencias de microondas y adquiriendo la notación espectral de la misma.

- El lector propuesto puede procesar los datos de la etiqueta, aún después que la misma ha sido leída y ha abandonado la zona de interrogación, mientras los lectores convencionales requieren que la etiqueta esté en la zona de interrogación para la lectura, debido a los algoritmos de comunicación entre la etiqueta y el lector.

La sección digital y la de radiofrecuencia son las partes principales del lector *chipless* RFID. En la figura 1.17 se muestra un diagrama en bloques de este tipo de lector, en este la unidad central de proceso (CPU) envía los datos a la sección de RF utilizando un convertor digital-analógico (DAC). Los datos analógicos se aplican como el voltaje sintonizador para el oscilador controlado por voltaje (VCO) que genera la señal de RF para interrogar la etiqueta pasiva.

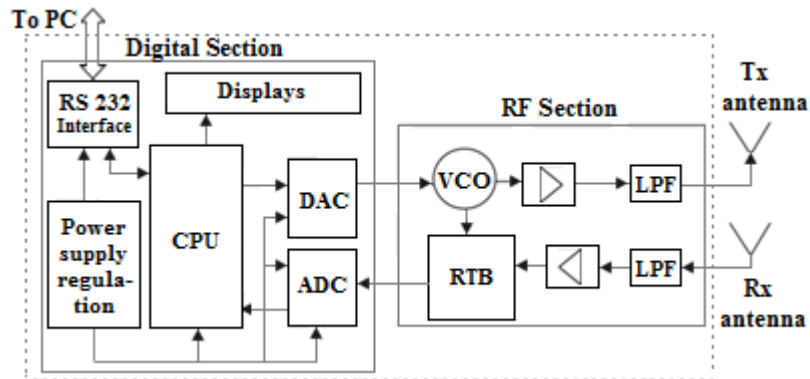


Fig. 1.17. Diagrama en bloques de un lector de RFID pasivo.

La señal recibida desde la etiqueta se filtra y amplifica antes de ser enviada al circuito de conversión de RF a banda base (RTB), donde se convierte a un valor analógico de DC para ser enviada a la sección digital donde se transforma en una señal digital empleando un convertor analógico/digital (ADC) luego se envía a la CPU para la decodificación del identificador de la etiqueta, el cual se muestra en un grupo de visualizadores siete segmentos y se envían a la computadora (host) principal.

El corazón de la sección digital es el micro-controlador Atmel AT89C52 de 8 bits que realiza el procesamiento de la señal y los algoritmos de decodificación de datos. El circuito transmisor está compuesto por un VCO que genera la señal de interrogación, que además se utiliza como referencia por el receptor. La señal de interrogación se amplifica, filtra y transmite por la antena directiva de banda ancha del lector. La señal de retorno desde la etiqueta se recibe por la antena receptora con polarización cruzada y se procesa

(filtra y amplifica) antes de ser enviada al circuito RTB, el que utiliza el detector de ganancia /fase AD8302 donde se compara la señal recibida con la señal de referencia del VCO y produce valores de corriente directa equivalentes a la diferencia de magnitud y fase entre las dos señales. Ambos valores de DC se multiplexan y envían a la sección digital. La sección transceptora se diseña para operar en la banda de frecuencias escogida para el sistema y detecta tanto variaciones de amplitud como de fase en la notación espectral de la etiqueta. El diagrama en bloques del transceptor se muestra en la figura 1.18

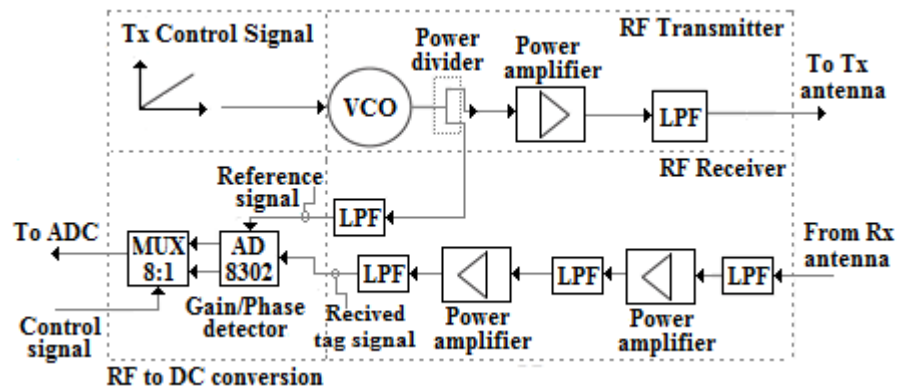


Fig. 1.18. Diagrama en bloques del transceptor de un lector RFID pasivo.

### 1.1.3 Superficies Selectivas en Frecuencia [12].

Una superficie selectiva en frecuencias es un arreglo periódico de aberturas o de elementos conductores. Como se observa en la figura 1.19, una FSS con elementos del tipo abertura trabaja como un filtro pasabandas, a medida que los elementos van entrando en resonancia, la estructura absorbe la onda incidente, hasta que a la frecuencia de resonancia, ocurre la transmisión total de la onda. Por otra parte, una FSS con elementos conductores opera como un filtro supresor de banda, cuando los elementos van entrando en resonancia reflejan la onda incidente, hasta que a la frecuencia de resonancia, se comporta como un conductor perfecto reflejando totalmente la onda incidente.

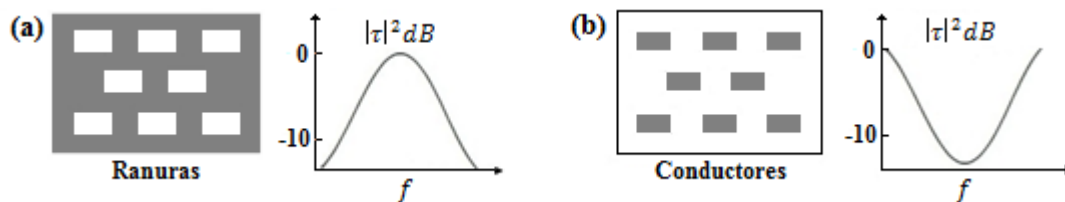


Fig. 1.19. Tipos de elementos para FSS. a) Ranuras. b) Conductores.

### 1.4.3.1 Superficies periódicas [13].

Una superficie periódica es un grupo de elementos idénticos ordenados en un arreglo infinito de una o dos dimensiones. La fig. 1.20 muestra un ejemplo donde un dipolo alimentado en su centro con impedancia de carga  $Z_L$  ha sido ordenado en un arreglo rectangular con separación entre elementos  $D_x$  y  $D_z$ .

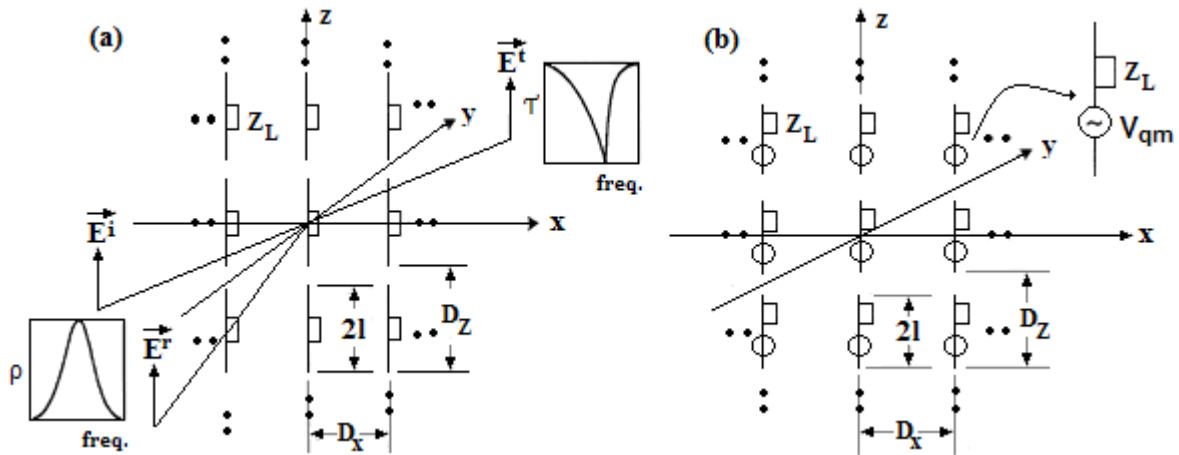


Fig. 1.20. a) Arreglo pasivo. b) Arreglo activo.

### 1.4.3.2 Arreglos pasivos & arreglos activos.

Cualquier arreglo periódico puede ser excitado de dos formas: por un plano de onda incidente, como se muestra en la figura 1.20a (arreglo pasivo) o por generadores individuales conectados a cada elemento (figura 1.20b Arreglo activo). En este último caso los generadores deben tener la misma amplitud y variación de fase lineal a lo largo de cada elemento del arreglo para que pueda clasificarse como una superficie periódica.

En el caso de un arreglo pasivo, una parte del plano de onda incidente se transmite en la dirección de propagación ( $E^t$ ) y la otra se refleja en la dirección contraria ( $E^r$ ). El coeficiente de reflexión se define como:

$$\rho = \frac{E^r}{E^i} \quad (1.12)$$

De igual forma el coeficiente de transmisión se define por la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{E^t}{E^i} \quad (1.13)$$

### 1.4.3.3 Arreglos de dipolos & arreglos de aberturas.

En lugar de los arreglos de dipolos con corrientes eléctricas mostrados en la figura 1.20, se pueden considerar también arreglos de corrientes magnéticas como el mostrado en la figura 1.21. Este arreglo puede además ser excitado de ambas formas, con un plano de onda incidente (pasivo) o por generadores individuales (activo). La diferencia de estos arreglos con respecto a los de dipolo es que en estos últimos se excitan las corrientes eléctricas en los alambres del dipolo mientras que en los de ranura se excitan las "corrientes magnéticas".

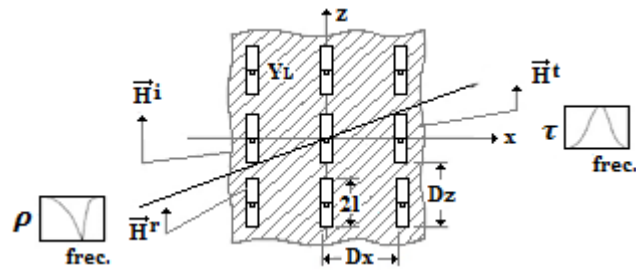


Fig. 1.21. Arreglo de ranuras excitado por un plano de onda incidente  $H^i$ .

Ambos casos son iguales y simétricos si se compara el campo eléctrico en el caso de un arreglo de dipolos con el campo magnético en un arreglo de ranuras.

La figura 1.22a muestra un arreglo de elementos finitos de longitud  $2l$  con igual distancia entre elementos ( $D_x$ ) mientras que en figura 1.22b se muestra un arreglo de varillas de longitud infinita el cual tiene mayor área conductiva que la anterior. No obstante, solo el caso con varillas finitas puede alcanzar una magnitud del coeficiente de reflexión igual a uno (cuando  $2l = \lambda/4$ ) mientras que el arreglo de varillas de longitud infinita lo alcanza únicamente con un voltaje de directa, el circuito equivalente mostrado a la derecha permite una mejor comprensión de este comportamiento. Las varillas infinitas se comportan como un grupo de inductores en serie mientras los elementos finitos tienen una serie de capacidades asociadas a la separación entre los elementos, por lo que puede ser modelado por un circuito equivalente LC; por lo que este último actuará como un verdadero plano de tierra en la frecuencia de resonancia, mientras que en el caso de las varillas infinitas esto no se puede lograr.

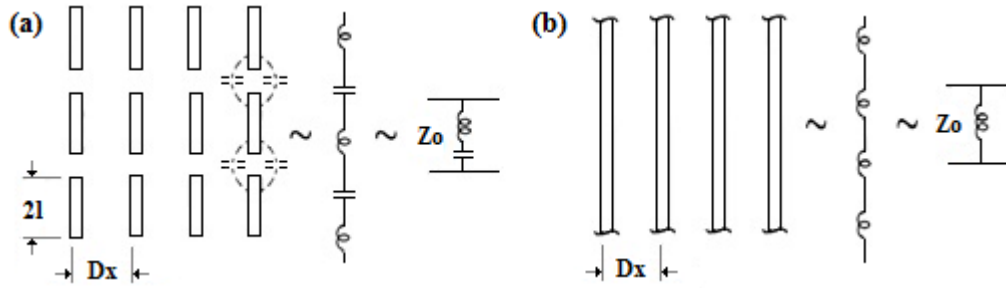


Fig. 1.22. Arreglo de elementos de longitud  $2l$ . b) Arreglo de varillas de longitud infinita; y sus circuitos equivalentes.

#### 1.4.4 Aspectos importantes de las FSS compuestas por lazos cuadrados resonantes concéntricos [14].

Las etiquetas pasivas compuestas por lazos cuadrados concéntricos explotan las propiedades de las superficies de alta impedancia (HISs) para obtener una etiqueta compacta compuesta por solo algunas celdas de meta-superficie. Cuando estas estructuras resonantes introducen una adecuada atenuación, se logra una absorción perfecta en cada frecuencia de resonancia. En dependencia del diseño del grupo de lazos resonantes, la estructura puede almacenar varios bits. Los estados "reflexión total" y "absorción total" codifican un bit "0" o un bit "1" respectivamente. La estructura propuesta es pasiva, compacta (hasta 3 cm), y puede fácilmente operar sobre una estructura metálica siendo utilizada esta última como plano de tierra.

##### 1.4.4.1 Principio de operación y modelo circuital.

La etiqueta propuesta está formada por una HIS finita compuesta por una FSS metálica montada sobre un dieléctrico muy delgado con plano de tierra, básicamente es una cavidad resonante caracterizada por una impedancia de entrada que tiende a infinito y cruces por cero de la fase de la señal reflejada en las frecuencias de resonancia. Si la estructura introduce una cantidad apropiada de pérdidas, en las frecuencias de resonancia se logra una absorción perfecta. Para crear una estructura multi-resonante capaz para funcionar como un *chipless* RFID, se emplea un elemento multi-resonador (grupo de lazos resonantes o celda) que se utiliza como la unidad básica de la FSS.

La impedancia de la superficie de la estructura multi-resonante HIS es igual a la conexión en paralelo entre la impedancia de la FSS ( $Z_{FSS}$ ) y la impedancia de la superficie del dieléctrico con plano de tierra ( $Z_d$ ) como se muestra en la ecuación 1.14.

$$Z_{HIS} = \frac{Z_d Z_{FSS}}{(Z_d + Z_{FSS})} \quad (1.14)$$

La capa dieléctrica delgada se comporta como un inductor si su grosor es menor que  $\lambda/4$  y su impedancia de entrada con incidencia normal se puede calcular con la ecuación siguiente:

$$Z_d = j\xi_m \tan(\beta d) = A + jB \quad (1.15)$$

Donde:

$Z_d$ : Impedancia de entrada de la lámina del dieléctrico,

$\xi_m$ : Impedancia característica de la lámina dieléctrica y

$\beta$ : Constante de propagación.

La impedancia característica de la lámina dieléctrica se calcula como:

$$\xi_m = \frac{\xi_0}{\sqrt{\varepsilon_r' + j\varepsilon_r''}} \quad (1.16)$$

Donde:

$\xi_0$ : Impedancia del espacio libre,

$\varepsilon_r'$ : Parte real de la permitividad dieléctrica relativa del dieléctrico y

$\varepsilon_r''$ : Parte imaginaria de la permitividad dieléctrica relativa del dieléctrico.

La constante de propagación se calcula como:

$$\beta = k_0 \sqrt{\varepsilon_r' + j\varepsilon_r''} \quad (1.17)$$

Donde:

$k_0$ : Número de onda del espacio libre.

Cada lazo de un grupo de lazos resonantes se comporta como un capacitor en la región de baja frecuencia y su impedancia se vuelve inductiva después de la resonancia; por tanto, la impedancia se puede modelar como un circuito serie LC. En consecuencia, la impedancia de un grupo de lazos resonantes es una estructura multi-resonante y el número de resonancias depende del número de lazos.

Para simplificar se considerará una celda compuesta por sólo dos lazos cuadrados. En este caso, la impedancia FSS que se calcula empleando la ecuación 1.18 y puede ser representada a través de una conexión en paralelo de dos resonadores LC en serie donde  $L_1$ ,  $C_1$ ,  $L_2$  y  $C_2$  son parámetros que caracterizan el primer y el segundo lazo resonador.

$$Z_{FSS} = \frac{(1 - \omega^2 L_1 C_1)(1 - \omega^2 L_2 C_2)}{j\omega C_1(1 - \omega^2 L_2 C_2) + j\omega C_2(1 - \omega^2 L_1 C_1)} = R + jX \quad (1.18)$$

Donde:

$L_1, L_2$ : Inductancias del primer y segundo lazo y

$C_1, C_2$ : Capacitancias del primer y segundo lazo.

La capacidad de un modelo periódico, impreso sobre un substrato con pérdidas no es puramente real, tiene una parte imaginaria representada por un resistor en paralelo, el cual tiene en cuenta la energía que se disipa en el capacitor. Como consecuencia, la  $Z_{FSS}$  tiene una parte real y una parte imaginaria, como se muestra en la ecuación 1.18. Para una estructura ideal sin pérdidas, la parte real de la impedancia de entrada  $Z_R$  es cero y la magnitud del coeficiente de reflexión siempre es igual a uno.

La impedancia de entrada de la HIS propuesta, realizada con un substrato de bajas pérdidas se caracteriza, en cambio, por una parte real muy alta y por una parte imaginaria que sufre una transición suave cruzando por cero. Una parte real muy alta conduce a una cantidad limitada de pérdidas por reflexiones. Cuando la parte real de la impedancia de entrada  $Z_{HIS}$  tiende a la impedancia del espacio libre, la estructura realiza una absorción de la señal entrante. Cuando la condición de resonancia de la HIS,  $X = -B$  se cumple, la parte real de  $Z_{HIS}$  se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$Re\{Z_{HIS}^{res}\} \approx \frac{B^2}{R} \quad (1.19)$$

Donde:

$B$ : Parte imaginaria de la impedancia de entrada de la lámina dieléctrica y

$R$ : Parte real de la impedancia de entrada de la FSS.

El término  $Re\{Z_{HIS}^{res}\}$  es directamente proporcional a la parte imaginaria de la impedancia de entrada del substrato ( $Z_d$ ) y es inversamente proporcional a la resistencia  $R$  de la FSS.



Otro aspecto importante a tener en cuenta para el análisis de la FSS es la resistencia de pérdidas dieléctricas que tiene en cuenta las pérdidas óhmicas y dieléctricas. La expresión analítica de  $R_d$  a la frecuencia de resonancia se presenta a continuación.

$$R_d \simeq \frac{-2\varepsilon_r''}{\omega C_0(\varepsilon_r' + 1)^2} \quad (1.20)$$

Donde:

$C_0$ : Es la capacidad de la estructura periódica sin sustrato dieléctrico.

Mientras mayor sean las pérdidas del dieléctrico, mayor será el valor de  $R_d$ . Si la capacidad de la FSS se incrementa (el espacio entre lazos cuadrados se reduce), el resistor decrece, por tanto, la resistencia de pérdidas dieléctricas de una estructura se establece al seleccionar la configuración de la FSS (ej. cinco lazos) y el tipo del sustrato (ej. FR4). El grosor del sustrato se puede ajustar para lograr una mejor absorción. En consecuencia, el factor de calidad del circuito paralelo RLC ( $Q = R_p\sqrt{C/L}$ ) queda establecido y es típicamente alto, donde  $R_p$  es el resistor en paralelo.

Como se observa en la figura 1.23, si se suman circuitos serie LC, el circuito equivalente permite modelar una HIS con un gran número de resonancias, donde cada circuito  $R_iL_iC_i$  está relacionado con el  $i$ -ésimo lazo resonante dentro de una celda.

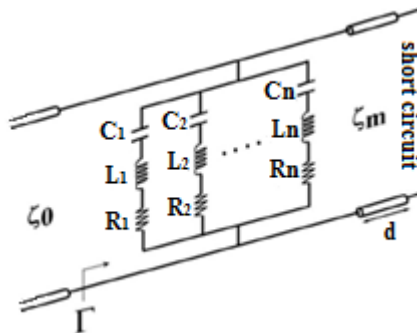


Fig. 1.23 Modelo de circuito equivalente de línea de transmisión.

#### 1.4.4.2 Desempeño frente a incidencia oblicua.

La evaluación de la estabilidad angular de la resonancia asociada con la información codificada es un aspecto importante a tener en cuenta para analizar el desempeño de un sistema de RFID. La impedancia de entrada del absorbedor se puede calcular utilizando

la relación 1.15, pero los términos de esta relación pueden variar con la incidencia oblicua pues se pueden inducir diferentes modos.

La frecuencia de resonancia depende del valor de las partes imaginarias de la impedancia del substrato con plano de tierra y de la impedancia de la FSS, esta no varía cuando cambia el ángulo incidencia porque el espesor del resonador es menor que la longitud de onda. Un lazo de poco grosor se caracteriza por una impedancia angular estable. La magnitud de coeficiente de reflexión está en cambio relacionada con la parte real de la impedancia de la FSS y esta varía de acuerdo al ángulo de incidencia. El único efecto nocivo de la incidencia oblicua es que puede provocar la aparición de picos de resonancia adicionales, sin embargo, estas resonancias espurias no son un gran inconveniente porque el lector conoce con antelación las frecuencias en las cuales la señal codificada se puede presentar por lo que estas resonancias se pueden despreciar fácilmente.

#### 1.4.4.3 Rango de lectura.

El rango de lectura de una etiqueta pasiva no está limitado por restricciones de potencia de la señal que interroga la etiqueta como ocurre para una convencional equipada con circuito integrado. Este rango de lectura está directamente relacionado con la sensibilidad del aparato receptor. Como consecuencia, la estimación del rango de lectura se puede realizar si se utiliza la ecuación 1.21 que permite la estimación del alcance máximo de un radar:

$$R_{range} = \sqrt[4]{\frac{G_T G_R \lambda^2 \sigma P_T}{(4\pi)^3 P_{min}}} \quad (1.21)$$

Donde:

$P_T$ : Potencia transmitida,

$\lambda$ : Longitud de onda,

$G_T, G_R$ : Ganancias de las antenas transmisoras y receptoras del interrogador respectivamente,

$P_{min}$ : Sensibilidad del receptor (la mínima potencia que puede detectar el receptor) y

$\sigma$ : Sección transversal de radar (RCS) de la etiqueta.

La RCS de la etiqueta RFID, está directamente relacionado con el tamaño de las etiquetas y esta puede ser estimada empleando la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{(4\pi)^3 r^4}{G_T^2 \lambda^2} |S_{21}|^2 \quad (1.22)$$

Donde:

$r$ : Distancia entre la antena del interrogador y la antena de la etiqueta y

$S_{21}$ : Raíz cuadrada de la potencia recibida sobre la transmitida.

El rango de lectura mejora cuando el transmisor incrementa la potencia y está en función de la ganancia de la antena patrón utilizada como antena de referencia. El desempeño de un sistema puede mejorar si se diseña un lector que explore el espectro solo en las frecuencias donde se esperan los picos de resonancia.

## **CAPITULO 2 . DISEÑO DE ANTENAS Y FSS PARA ETIQUETAS DE RFID PASIVAS EN LA BANDA DE UHF Y MICROONDAS.**

En este capítulo se estudian los avances en el diseño de antenas para etiquetas pasivas de RFID y FSS, con el objetivo de mejorar el desempeño general del sistema. A diferencia de otras tecnologías donde las antenas se ajustan para obtener impedancias de 50 o 75  $\Omega$ , las antenas de RFID se diseñan para acoplarse a las impedancias de los circuitos integrados de aplicación específica, que normalmente presentan baja resistencia (menores a 10  $\Omega$  en algunos casos) y reactancias capacitivas del orden de -100  $\Omega$  a los -400  $\Omega$  [15].

Las características más importantes a tener en cuenta para el diseño de antenas de RFID son las siguientes: la antena debe ser pequeña para ser adherida a diferentes objetos, con patrón de radiación omnidireccional, debe proveer la mayor cantidad de energía al CI, ser robusta y tener bajos costos de producción [16]. Las técnicas de diseño aquí presentadas buscan cumplir con cada una de estas características por medio de técnicas de miniaturización.

El proceso de diseño de estas antenas parte de tomar un diseño ya conocido y manipular sus dimensiones, a partir de estas modificaciones optimizar algún parámetro en particular (ganancia, ancho de banda, patrón de radiación, entre otros). Este proceso muchas veces es intuitivo y empírico lo que puede generar antenas con bajo desempeño [17]. Por ello existen métodos de optimización (Algoritmos Genéticos, Mínimos Cuadrados, Redes Neuronales) que realizan la búsqueda del diseño más adecuado para cada aplicación.

### **2.1 Técnicas de miniaturización de antenas para etiquetas con CI.**

Existen diversos tipos de antenas que se utilizan para etiquetas pasivas de RFID, el tipo de antena está relacionado con su aplicación, pues no existe una antena perfecta para todas las aplicaciones. Por ejemplo las antenas de parche y las F invertida son apropiadas para operar en objetos metálicos, ya que pueden ocupar el objeto como su

plano de tierra. Las antenas F invertida y dipolos modificados (serpenteadas, dipolos doblados) pueden operar sobre otros tipos de materiales como pueden ser, madera, cartón, plásticos, entre otros. [16].

### 2.1.1 Antenas de F invertida.

La antena F invertida (IFA) está compuesta por un elemento rectangular, localizado sobre un plano de tierra, un terminal en corto circuito y un mecanismo de alimentación como se muestra en la figura 2.1a, estas son una variante de la antena monopolo [10], donde el doblado de la parte superior genera capacidades parásitas que se reducen a través de un elemento abierto. Esto permite que exista un buen acoplamiento de impedancias con los circuitos integrados de RFID y reduce su tamaño [18].

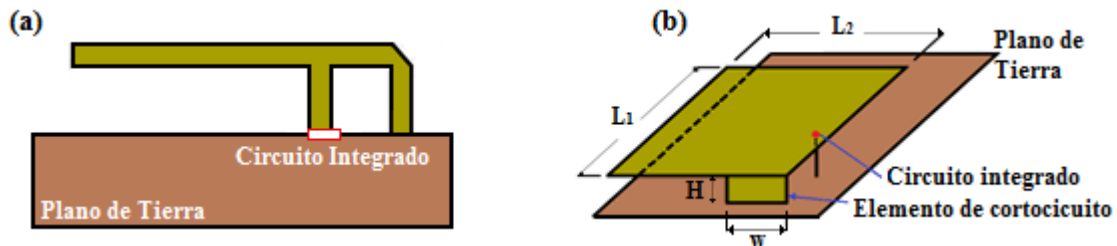


Fig. 2.1. Configuración Básica de una IFA. Esquema general de una PIFA.

Una de las variantes de este diseño son las PIFA o antenas de F invertida planas, donde el elemento radiador es remplazado por un plano más grande como se muestra en la figura 2.1b, para incrementar el ancho de banda de la antena. En la figura 2.1b, la variación en  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $H$  y  $w$  permiten obtener una antena con la impedancia requerida para un circuito integrado.

### 2.1.2 Antenas de ranura.

Las antenas de ranura se emplean en algunos casos para identificación de seres humanos, en la figura 2.2 se muestra el diseño básico, el cual ofrece grandes posibilidades para acoplarse a los CI de RFID aún en presencia de objetos con una gran permitividad.

El contorno de la ranura se puede ver como un transformador de impedancias, en este tipo de antena, el aumento del número de las ranuras permite la miniaturización de la misma y agregar características multi-banda [19]. Los parámetros de esta se pueden ajustar variando sus dimensiones, por ejemplo, en la figura 2.2 el lado "L" determina la

ganancia máxima de la antena, mientras que “a” y “b” permiten ajustar la impedancia de entrada.

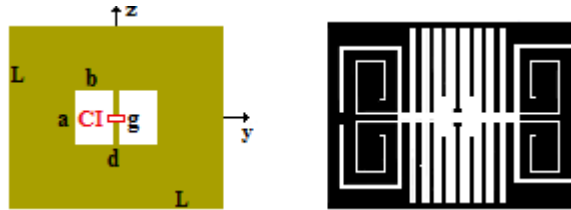


Fig. 2.2. Configuración de una antena de ranura.

### 2.1.3 Antenas tipo texto.

Se consideran un subgénero de las antenas lineales serpenteadas (MLA), la utilización de texto en las etiquetas no sigue las reglas de construcción básica de las MLA, pues existen más elementos que afectan la impedancia de la antena. Existen razones comerciales para el uso de texto, como puede ser el logo o nombre de las compañía en las etiquetas de RFID que identifiquen de manera visual los productos. El ejemplo mostrado en la figura 2.3, mantiene la forma de las letras y se une por la parte inferior.



Fig. 2.3. Ejemplo de una antena tipo texto.

### 2.1.4 Antenas lineales serpenteadas.

La MLA, es una propuesta atractiva para la reducción de tamaño y costo de las etiquetas de RFID. Los dobleces de estas antenas generan reactancias capacitivas e inductivas, variando la impedancia de entrada de la antena, permitiéndole resonar a frecuencias más bajas que un dipolo básico con dimensiones similares y acoplarse con los CI a una frecuencia dada.

Si se toma como referencia la figura 2.4, los parámetros de una MLA son: “n” número de vueltas y la longitud de los segmentos verticales (h) y horizontales (w).

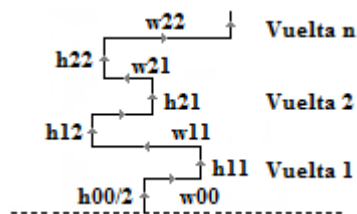
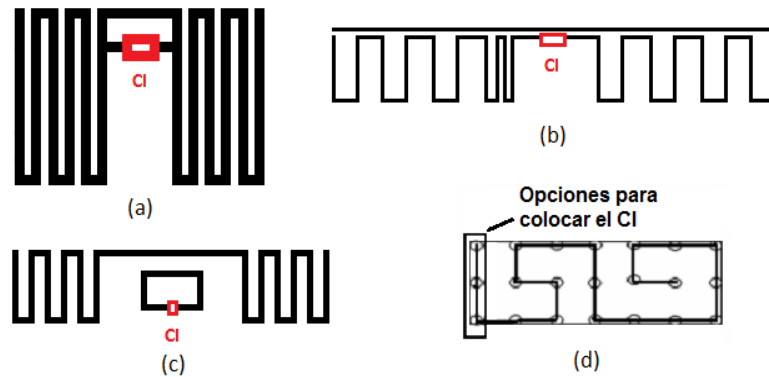


Fig. 2.4. Parámetros físicos de una MLA.

Un método básico para la construcción de MLAs es hacer una matriz de puntos en un área delimitada como se aprecia en la figura 2.5d. La carga se debe colocar en uno de los extremos debido que al final se generará una matriz espejo y la carga debe estar entre estas dos matrices. Para llevar el orden de las posibles combinaciones, todos los puntos son numerados y se aplican las siguientes reglas [20]:

- Se consideran como puntos de partida aquellos localizados en el extremo de la matriz (debido a que es el punto de conexión con el CI).
- La línea serpenteada sólo puede pasar una vez por cada punto.
- Se deben cubrir todos los puntos.

El procedimiento antes descrito permite encontrar un diseño que se ajuste a la impedancia del CI. Este método básico se puede mejorar si se emplean algoritmos de optimización, lo que permitirá incrementar del número de posibles estructuras. Algunas propuestas realizadas con la utilización esta técnica se muestran en la figura 2.5a, b y c.



**Fig. 2.5.** Ejemplos de MLA. Antena (a) propuesta en [11], (b) propuesta en [4], (c) propuesta en [15], (d) diseño de una MLA utilizando una matriz de puntos.

La antena de la figura 2.5a realizada por Naobumi Michishita y Yoshihide Yamada [20] por medio del serpenteo y un sustrato con una  $\epsilon_r = 10$ , permite obtener una antena con dimensiones de 1.26 x 1.57 cm que trabaja en los 953 MHz, obteniéndose una ganancia de 2.8 dB.

La antena de la figura 2.5b, es una propuesta pensada para procesos más comerciales [21] (cajas de cartón); si se aplica el serpenteo asimétrico se conservan algunas impedancias parásitas que permiten el acoplamiento con el CI de RFID. Las dimensiones de esta antena son de 1.57 x 7.57 cm y se reporta una ganancia de 1.5 dB

La antena de la figura 2.5c es una antena compuesta por un lazo y un reflector serpenteado [22]. La variación del tamaño del lazo permite ajustar el intervalo de operación de esta antena. Sus dimensiones son de 1.57 x 7.4 cm y reporta una ganancia de 1 dB a una frecuencia de 915 MHz.

## 2.2 Técnicas para el acoplamiento de impedancias.

La impedancia de una antena es una función compleja que depende de la frecuencia, el diseño eficiente de una red de acoplamiento permite que exista mayor transferencia de energía entre dos dispositivos. En una etiqueta de RFID se logra máxima transferencia de energía entre la antena y el circuito integrado si las impedancias entre estos dos elementos son complejas conjugadas.

### 2.2.1 Acoplamiento de T [23].

El acoplamiento T, consta de un dipolo con un largo  $l$  y ancho  $w$  que es conectado al circuito integrado por medio de otro dipolo de largo  $l'$  y ancho  $w'$  separados a una distancia  $s$  como se muestra en la figura 2.6a. El circuito equivalente para el cálculo de la impedancia se muestra en la figura 2.6b.

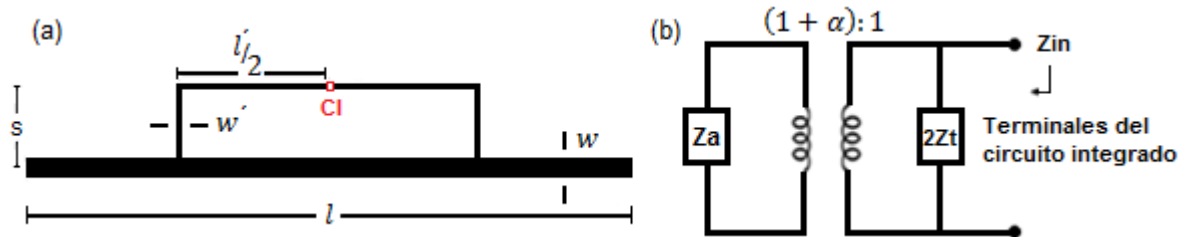


Fig. 2.6. a) Acoplamiento T. b) Circuito equivalente.

Para el análisis de esta configuración, se considera un sistema balanceado que puede ser dividido en dos modos: el modo de línea de transmisión y el modo de antena. Este tipo de análisis permite calcular la impedancia de entrada utilizando la ecuación 2.1 [33]:

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} = \frac{2Z_t(1 + \alpha)^2 Z_a}{2Z_t + (1 + \alpha)^2 Z_a} \quad [\Omega] \quad (2.1)$$

Donde:

$R_{in}$ ,  $X_{in}$ : Resistencia y reactancia de entrada respectivamente.



$$Z_t = jZ_0 \tan\left(k \frac{l'}{2}\right) \quad (14) \quad (2.2)$$

Donde:

$Z_t$ : Impedancia de entrada en modo línea de transmisión [ $\Omega$ ].

$k = 2\pi/\lambda$  Constante de propagación de onda [1/m].

$Z_0$ : Impedancia característica [ $\Omega$ ].

$l'$ : Longitud del segundo dipolo [m].

$Z_a = R_a + jX_a$  Impedancia de la antena [ $\Omega$ ].

$R_a$  y  $X_a$ : Resistencia y reactancia de la antena respectivamente [ $\Omega$ ].

$\alpha = w/w'$  Factor de división de corriente.

$w$  y  $w'$ : Ancho del primer y segundo dipolo respectivamente [m].

La parte real e imaginaria de la impedancia de la antena se pueden obtener mediante las ecuaciones 2.3 y 2.4 [33].

$$R_a = \frac{n}{2\pi} \left( C + \ln(kl) - Ci(kl) + \frac{1}{2} \text{sen}(kl) * [Si(2kl) - 2Si(kl)] \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \cos(kl) * \left[ C + \ln\left(\frac{kl}{2}\right) - Ci(2kl) - 2Ci(kl) \right] \right) [\Omega] \quad (2.3)$$

$$X_a = \frac{n}{4\pi} \left( 2Si(kl) + \cos(kl) * [2Si(kl) - Si(2kl)] - \text{sen}(kl) * \right. \\ \left. \left[ 2Ci(kl) - Ci(2kl) - Ci\left(\frac{2kr^2}{l}\right) \right] \right) [\Omega] \quad (2.4)$$

Donde:

$C$ : Constante de Euler.

$r$ : Representa el ancho del conductor.

$Si$  y  $Ci$ : Seno y coseno integral [33].

En las ecuaciones 2.3 y 2.4 se observa que la impedancia de la antena depende del largo y de la constante de propagación que a su vez depende de la longitud de onda. Para el cálculo del modelo de línea de transmisión, se utilizan expresiones ya definidas para la impedancia característica en conductores planos [36], como la que se emplea a continuación.

$$Z_0 = \frac{148}{\ln\left(2 \frac{s+w'}{s+w} \frac{s+w}{s}\right)^{\frac{1}{4}}} [\Omega] \quad (2.5)$$

En este caso, se considera el ancho de los dos conductores ( $w$  y  $w'$ ) y la separación entre ellos ( $s$ ).

La ecuación 2.1 posibilita el cálculo de la impedancia al realizar variaciones en la antena. Para analizar el comportamiento se propone una antena con acoplamiento T calculada para media longitud de onda a una frecuencia de 915 MHz ( $l = 16.4\text{cm}$ ). La respuesta se muestra en la figura 2.7a para la parte resistiva y 2.7b para la parte reactiva.

En las gráficas, uno de los ejes representa la variación de la longitud del segundo dipolo ( $l'$ ), el otro eje la separación entre los dos dipolos ( $s$ ) y el último representa la resistencia ( $R_{in}$ ) y reactancia ( $X_{in}$ ) respectivamente.

De la figura 2.7, se puede concluir que la impedancia de entrada de la antena cambia al hacer variaciones de ( $l'$ ) y ( $s$ ).

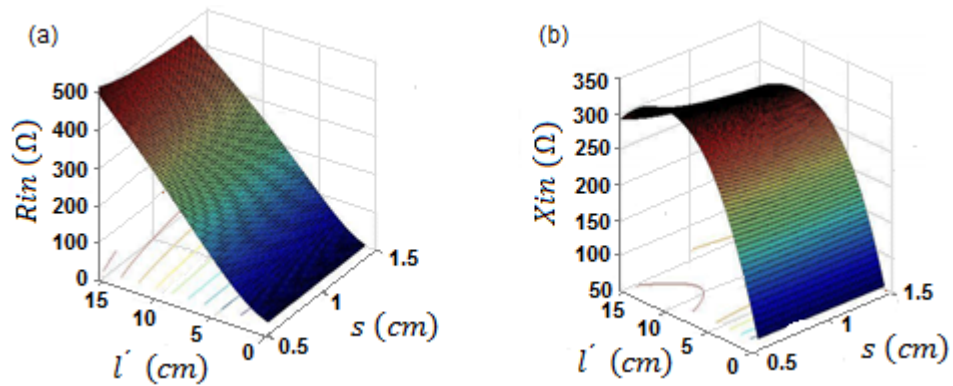


Fig. 2.7. Variación de la impedancia de la antena en relación a sus dimensiones. (a) Resistencia, (b) Reactancia.

### 2.2.2 Acoplamiento Inductivo [24].

El acoplamiento inductivo es una técnica empleada en antenas pequeñas, en las que por medio de un lazo y un elemento reflector se pueden obtener diferentes valores de impedancias como se muestra en la figura 2.8a. Su circuito equivalente se muestra en la figura 2.8b.

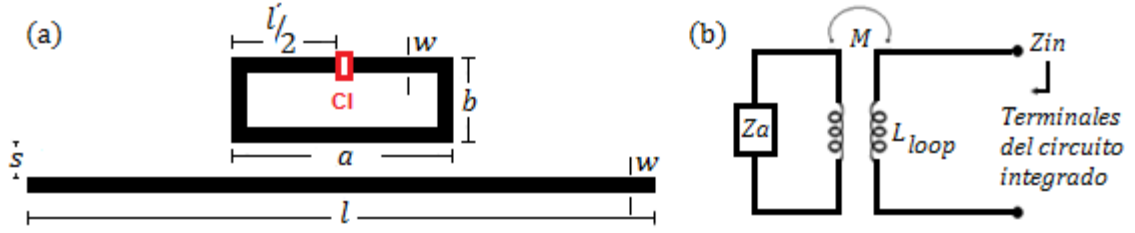


Fig. 2.8. a) Acoplamiento inductivo. b) Circuito equivalente.

Como se aprecia en la figura 2.8b el acoplamiento se puede analizar como si fuera un transformador. Para calcular la impedancia de entrada se utilizan las siguientes ecuaciones.

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} = Z_{loop} + \frac{(2\pi fM)^2}{Z_a} \quad [\Omega] \quad (2.6)$$

Donde:

$R_{in}$  y  $X_{in}$ : Resistencia y reactancia de entrada respectivamente  $[\Omega]$ .

$Z_{loop}$  y  $Z_a$ : Impedancia del lazo y de la antena respectivamente  $[\Omega]$ .

$f$ : Frecuencia  $[\text{Hz}]$ .

$M$ : Inductancia Mutua  $[\text{H}]$ .

La ecuación 2.7 permite calcular la impedancia del lazo ( $Z_{loop}$ ).

$$Z_{loop} = j2\pi f L_{loop} \quad [\Omega] \quad (2.7)$$

Donde  $L_{loop}$  es la inductancia del lazo y esta se puede estimar mediante la siguiente expresión [38]:

$$L_{loop} = 4 \times 10^{-7} \left\{ a \ln \left( \frac{2a}{w} \right) + b \left( \frac{2b}{w} \right) + 2\sqrt{a^2 + b^2} - a \ln \left[ \frac{a}{b} + \sqrt{\left( \frac{a}{b} \right)^2 + 1} \right] \right. \\ \left. - b \ln \left[ \frac{b}{a} + \sqrt{\left( \frac{a}{b} \right)^2 + 1} \right] - 2(a + b) \right\} \quad [\text{H}] \quad (2.8)$$

$$L_{loop} = 8 \times 10^{-7} a \left[ \ln \left( \frac{2a}{w} \right) + \sqrt{2} - \ln(1 + \sqrt{2} - 2) \right] + 8 \times 10^{-7} a \left[ \ln \left( \frac{a}{w} \right) - 0.774 \right] \quad [\text{H}] \quad (2.9)$$

Donde  $w$  es el ancho del conductor [m].

Para obtener la inductancia mutua en este tipo de estructuras se utiliza la ecuación 2.10 [29] que relaciona las dimensiones del lazo y la separación con el reflector.

$$M = 2 \times 10^{-7} \frac{ab}{s} \quad [\text{H}] \quad (2.10)$$

Para obtener  $Z_a$  se utilizan las ecuaciones 2.3 y 2.4 como en el caso del acoplamiento T. En los casos donde el reflector está en resonancia, la reactancia total de entrada depende de la inductancia del lazo, mientras que la resistencia está relacionada con la inductancia mutua (M) entre este y el reflector [37].

$$R_{in}(f_0) = \frac{(2\pi f_0 M)^2}{R_a(f_0)} \quad [\Omega] \quad (23) \quad (2.11)$$

$$X_{in}(f_0) = j2\pi f_0 L_{loop} \quad [\Omega] \quad (24) \quad (2.12)$$

Para una antena que opere a 915 MHz con un lazo cuadrado se realizan variaciones tanto en  $a$ ,  $b$  y  $s$ , con el propósito de observar el comportamiento, dando como resultado las gráficas mostradas en la figura 2.9a para la parte resistiva y 2.9b para la reactiva.

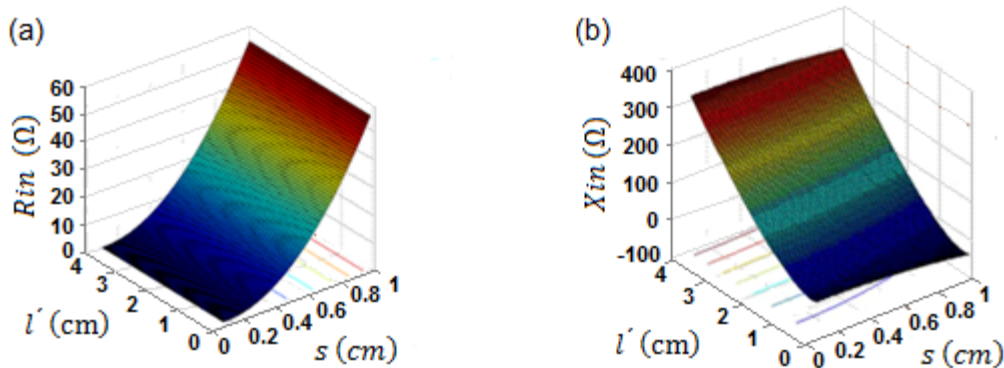


Fig. 2.9. Variación de la impedancia de la antena en relación a sus dimensiones (a) Resistiva, (b) Reactiva.

### 2.2.3 Aplicación de las Técnicas de Acoplamiento en RFID.

Las técnicas antes mostradas se han aplicado en la tecnología RFID ante la necesidad de un método que permita el acoplamiento con el circuito integrado. En la figura 2.10 se presenta la evolución de las antenas de RFID, como se aprecia se partió de un modelo

básico con Acoplamiento T, al que se le fueron agregando elementos parásitos y posteriormente elementos de serpenteo para culminar con una técnica de acoplamiento inductivo combinado con el serpenteo.

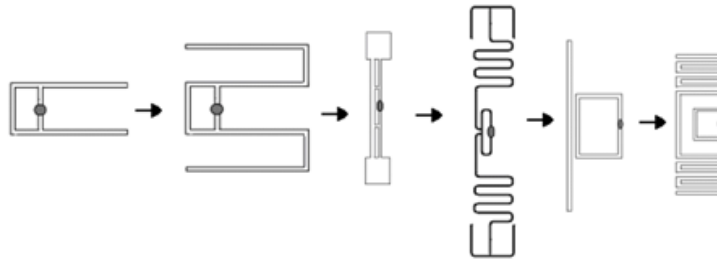


Fig. 2.10. Evolución de las antenas para etiquetas pasivas de RFID.

### 2.3 Proceso de diseño de antenas para etiquetas pasivas de RFID [25].

La metodología propuesta consta de una serie de pasos para el diseño de antenas para dispositivos de RFID, este procedimiento considera el tipo de aplicación, requerimientos, tipo de diseño, optimización y caracterización. Basándose en esta metodología general, se propone un proceso de diseño para este trabajo, el cual se muestra en la figura 2.11 donde se realizan una serie de pasos enfocados a perfeccionar el acoplamiento de impedancias de la antena con el CI.

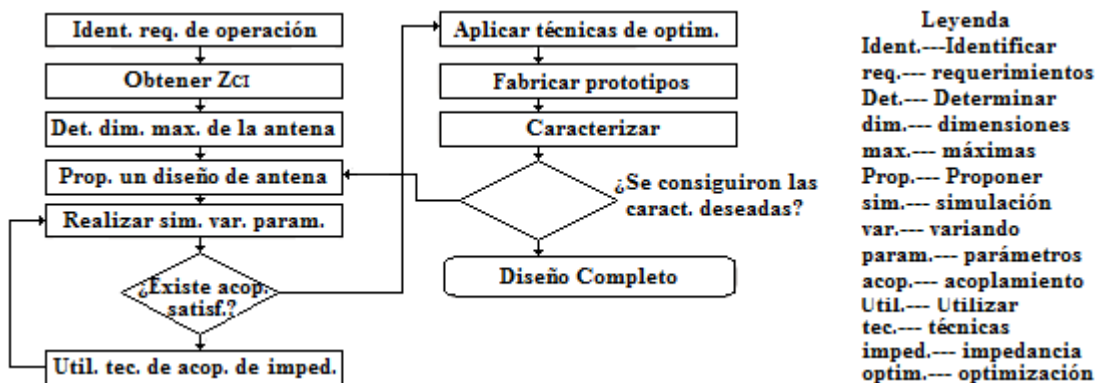


Fig. 2.11. Diagrama del Proceso de Diseño para Antenas de RFID.

### 2.4 Requerimientos de Operación.

El proceso de diseño permite determinar los parámetros que desean obtener de la antena y que se van a utilizar en la etiqueta de RFID, como son:

**Frecuencia de operación:** Puede cubrir todo el espectro de UHF de 860 a 960 MHz o reducirlo para operar conforme a las normas de alguna región en específico.

**Distancia de lectura máxima:** Dependerá de las necesidades. Para algunas aplicaciones se puede considerar de uno a tres metros, para otras se puede alcanzar los 15 m.

**Coefficiente de transferencia de energía:** Es una medida de la eficiencia del sistema.

**Costos:** El costo debe ser reducido, esto limita algunas opciones, por ejemplo la selección del tipo de sustrato y el diseño de la antena.

Definir estos objetivos, permite tener una idea clara del diseño y complejidad de las antenas.

### **2.4.1 Impedancia del circuito integrado.**

Conocer la impedancia del CI, así como su sensibilidad es fundamental para obtener el mejor desempeño posible de la etiqueta de RFID. Los valores de impedancia de los CI se obtienen normalmente del fabricante, por medio de la hoja de datos, aunque con el inconveniente de que solo muestran algunas frecuencias.

## **2.5 Propuesta de diseño de la antena.**

Debe considerarse que las dimensiones máximas de la antena influyen en la ganancia y ancho de banda máximo que se puede obtener [26], por tanto existe un compromiso entre las dimensiones máximas de la antena y satisfacer los requerimientos planteados. En cuanto a las propuestas de diseño, se pueden emplear los métodos descritos en 2.1, que permiten miniaturizar antenas y acoplarse a los circuitos integrados. El diseño de la antena de la etiqueta depende de la aplicación del sistema de RFID.

### **2.5.1 Proceso de simulación.**

El análisis de antenas de RFID, se hace por medio de modelos electromagnéticos y herramientas de simulación [16]. Debido a la complejidad del análisis de estas estructuras, en los últimos años, se han utilizado herramientas computacionales precisas, basadas en métodos numéricos. Esta familia incluye: el Método de Momentos (MoM), el Método del Elemento Finito (FEM), Técnica de Integración Finita (FIT) y el Método de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD), a partir de los cuales se han generado múltiples programas de simulación, cada uno utilizado para diferentes tipos de problemas de diseño. La figura 2.12, muestra algunos ejemplos de simuladores electromagnéticos, agrupados por el método numérico que emplean.

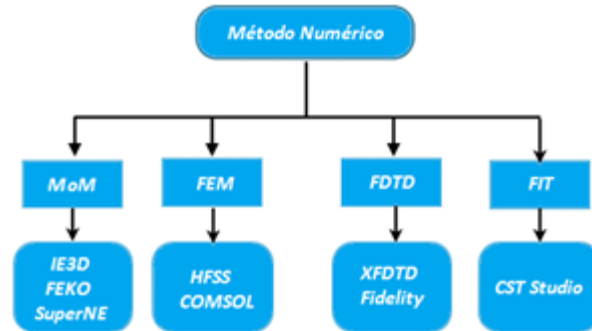


Fig. 2.12. Métodos numéricos y programas de simulación.

## 2.6 Proceso de optimización.

Este proceso se realiza para mejorar aquellos puntos en los que el proceso de prueba y error llevaría mayor cantidad de tiempo o en los que a pesar de obtener algún acoplamiento, este no consiga acercarse a los requerimientos planteados.

La optimización de las antenas de RFID se realiza variando las dimensiones de la antena, en el caso de las MLA, el número de serpenteos, el ancho y alto de cada sección, si se utiliza alguna técnica de acoplamiento se debe incluir el tamaño del lazo rectangular o del acoplador tipo T. La meta de los métodos de optimización es encontrar una solución que permita obtener los mejores parámetros (ancho de banda, ganancia, eficiencia, impedancia de entrada, entre otros.).

## 2.7 Elementos más utilizados para construcción de FSS [13].

Cuando se diseña una FSS, con características pasa banda o supresor de banda, la selección del elemento apropiado es de suma importancia. Algunos elementos poseen inherentemente mayor o menor ancho de banda con respecto a otros, mientras algunos pueden ajustarse con el diseño. Este apartado presenta el comportamiento típico de los elementos más comunes disponibles para el diseño de FSS. Debe tenerse en cuenta que al juzgar un tipo de elemento, podría tenderse a escoger uno donde el ancho de banda alrededor de la primera resonancia varía lo menos posible con la polarización. Sin embargo, hay que tener en cuenta que en general, al menos por razones mecánicas, toda FSS debe tener sustrato dieléctrico.

La variación de ancho de banda con el ángulo de incidencia depende en gran medida de la correcta selección del tipo de elemento y el sustrato; aunque una FSS sea más estable sin una lámina dieléctrica, esta no es una elección adecuada para el diseño final. Además

el ancho de banda de una FSS en general puede ser ajustado por la variación de la separación entre los elementos. Una mayor separación, producirá una disminución del ancho de banda y viceversa. Sin embargo, se deben tener en cuenta dos aspectos: la aparición lóbulos no deseados y una mayor variación de la primera frecuencia de resonancia con el ángulo de incidencia y la polarización.

Las curvas presentadas en la figura 2.13 tienen una separación pequeña entre sus elementos, esto permite obtener mayor rango de lectura y estabilidad de la frecuencia de resonancia con respecto a ángulo de incidencia.

**Grupo 1:** Elementos conectados al centro o N-polos, como el tipo lineal simple, tres piernas, ancla, cruz de Jerusalén y espirales cuadradas.

**Grupo 2:** Elementos de lazo, como los elementos de tres o cuatro piernas conectados, lazos circulares, lazos cuadrados y hexagonales.

**Grupo 3:** Los de plato o interior sólido de varias formas.

**Grupo 4:** Combinaciones. La lista es interminable.

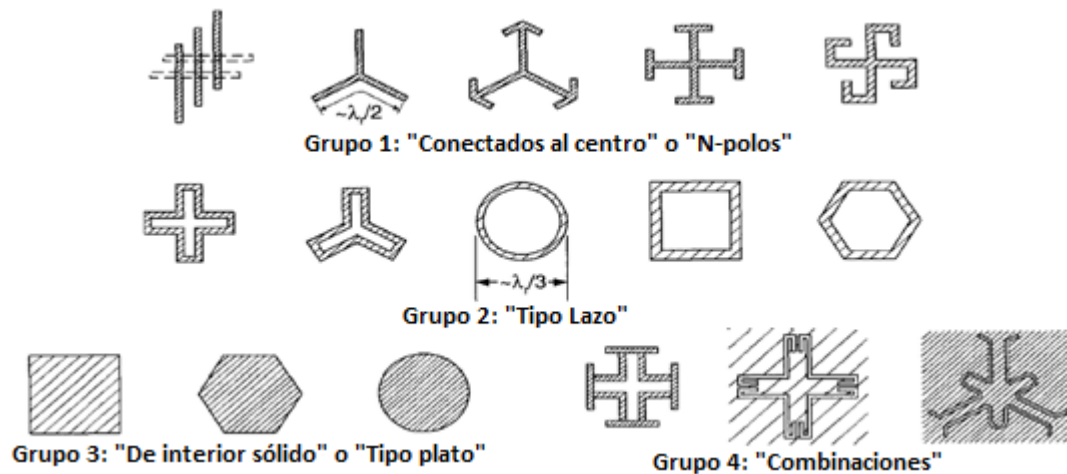


Fig. 2.13. Elementos típicos para FSS ordenados en grupos.

### 2.7.1 Comparación entre elementos. [13]

Las características del elemento a emplear dependen de la aplicación de la FSS. Sin embargo, ciertas características destacan por ser deseables para la mayoría de aplicaciones.



Primero, un elemento de calidad debe tener una frecuencia de resonancia estable con el ángulo de incidencia, la mayoría de elementos presentados en el epígrafe anterior tienen buen comportamiento en cuanto a esto, principalmente porque los espacios entre estos son en términos de longitud de onda. Los espaciamentos mayores que  $\lambda/2$  conducirán a la aparición de lóbulos indeseados, que pueden desplazar la frecuencia de resonancia fundamental ( $f_0$ ) hacia abajo en el espectro, dependiendo del ángulo de incidencia sin importar el tipo de elemento.

Estos elementos deben ser pequeños en términos de longitud de onda. Los principales candidatos con esta característica son los elementos de tipo lazo, como son los elementos de tres o cuatro piernas conectadas, lazos circulares, cuadrados y en particular, los elementos hexagonales para aplicaciones de banda ancha, aunque pueden verse muy diferentes a primera vista, todos son elementos de tipo lazo, que resuenan cuando su circunferencia se acerca a la longitud de onda o algo menor (hexágono) y su tamaño es típicamente menor a  $0.3\lambda$  sin dieléctrico.

El diseño de los lazos ofrece al diseñador distintos anchos de banda ( $AB$ ) desde los más estrechos (elemento de tres o cuatro piernas conectadas) hasta los más amplios (hexágono). Aunque las FSS pueden cambiar el  $AB$  variando los espacios entre elementos, los elementos de tres o cuatro piernas pueden hacerlo modificando los elementos en sí mismos. Esto es significativo, pues si se mantiene una separación entre elementos pequeña, se demora del inicio de lóbulos no deseados.

En contraste a la familia del lazo está el grupo de elementos conectados al centro típicamente representado por el *gangbuster*, los elementos de tres piernas desconectados, el ancla, la cruz de Jerusalén, y la espiral cuadrada. Sin embargo, si se colocan los elementos muy cercanos, es posible obtener anchos de banda bastante grandes y nulos de interacción modal tan estrechos que son bastante insignificantes para muchas aplicaciones.

La espiral cuadrada es sumamente interesante porque no sólo refleja, también puede absorber la onda incidente, posee un  $AB$  muy grande acercándose al del hexágono, el espacio entre elementos, es menor que los del hexágono, pues las espirales están contenidas unas dentro de las otras lo que permite obtener una  $f_0$  superior.

Los elementos de interior sólido tienen muy pocas aplicaciones, se emplean mayormente en unión con FSS "complementarias" adyacentes a estos. La lista de elementos de

combinación parece no tener fin y crece más cada día; del análisis realizado se considera la familia con mejores prestaciones es la de los elementos de lazo y la de mayores limitaciones la de los elementos de tipo plato.

## CAPITULO 3 . DISEÑO DE ANTENAS UTILIZANDO LA TÉCNICA DEL SERPENTE Y FSS COMPUESTAS POR LAZOS CUADRADOS CONCÉNTRICOS.

En este capítulo se presenta el diseño una antena impresa para etiquetas de RFID pasivas con CI empleando la técnica del serpenteo y se propone el diseño de una superficie selectiva en frecuencias (FSS) compuesta por lazos cuadrados concéntricos para una etiqueta de RFID pasiva sin circuito integrado donde se presta especial atención a la secuencia de bits codificados. El diseño se realiza auxiliándose del simulador electromagnético de estructuras de alta frecuencia HFSS. La antena lineal serpenteada se optimiza para mejorar el acoplamiento de impedancias, característica crítica del diseño de las antenas para etiquetas de RFID pasivas, pues un correcto acoplamiento permite máxima transferencia de energía entre la antena y el CI, este se cuantifica con el cálculo de las pérdidas de retorno  $S_{11}$ .

### 3.1 Requerimientos para la antena lineal serpenteada.

Los requerimientos que deben cumplir las antenas se presentan a continuación.

**Frecuencia de Operación:** En el intervalo de 902 a 928 MHz, especificado en la NOM121 [1].

Distancia máxima de lectura: Mínimo de 16 metros.

Coefficiente de transferencia de energía: mayor de 0.7.

Impedancia del CI:  $Z_c = 6.7 - j206 \Omega$  correspondiente al CI Atmel ATA5590.

Dimensiones Máximas: 1.5 x 10 cm (medida estándar de las etiquetas comerciales).

Material: para la fabricación de la antena se utilizará cobre de 0.05 mm de espesor, sobre un sustrato dieléctrico de Rogers Duroid (con una  $\epsilon_r = 1.2$ ), con 1.5 mm de espesor.

### 3.2 Propuesta de Diseño.

La propuesta de diseño para la antena se muestra en la figura 3.1. Esta antena se forma por un elemento serpenteado y un lazo rectangular. Para que la antena se acople con el circuito integrado su impedancia debe ser  $6.7+j206 \Omega$ , en el diseño, primero se ajustan las dimensiones del lazo rectangular lo que permite ajustar la parte reactiva de la impedancia total y después la separación entre reflector y la cinta rectangular que proporciona la parte resistiva.

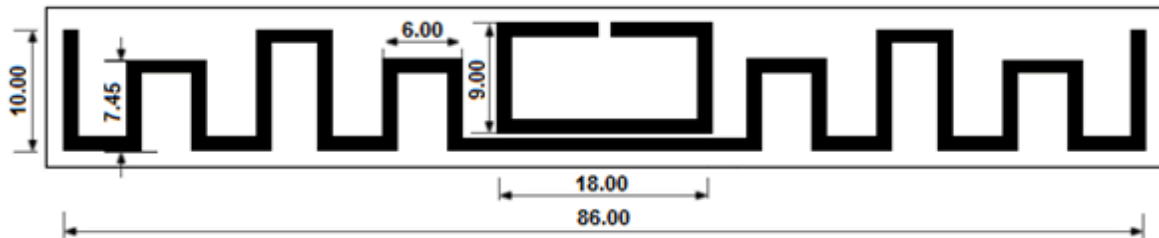


Fig. 3.1. Diseño de la MLA.

La reactancia de la cinta rectangular se calcula a través de las ecuaciones 2.8 y 2.9 modificando estas y manteniendo un ancho de las líneas de un 1 mm, se obtiene una gráfica como se muestra en la figura 3.2, donde la reactancia de la cinta rectangular se muestra en el eje "Y"; la base del rectángulo (a) en el eje "X" superior y la altura (b) en el eje "X" inferior. El comportamiento que se tiene es lineal ya que la longitud de la base es el doble de la altura.

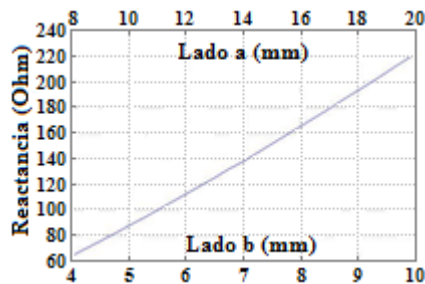


Fig. 3.2. Reactancia teórica al variar los parámetros de un lazo rectangular.

### 3.3 Simulación de la MLA en HFSS.

La simulación de la MLA para la simulación en HFSS se realiza utilizando el siguiente procedimiento 1) Dibujar el modelo geométrico. 2) Modificar los parámetros de diseño del

modelo. 3) Asignar variables a los parámetros de diseño del modelo. 4) Especificar la configuración de la solución para el diseño. 5) Validar el diseño. 6) Ejecutar la simulación en HFSS. 7) Graficar los resultados [27].

Con el objetivo de facilitar el proceso de optimización, se asignaron variables a las dimensiones de la antena, posibilitando que esta se ajuste a las variaciones de algunos parámetros. La excitación se aplica sobre el lazo rectangular en la posición donde se coloca el CI utilizando un puerto con impedancia  $Z_a = 6.7 + j206 \text{ } [\Omega]$ , ideal para que exista máxima transferencia de potencia entre la antena y el circuito integrado Atmel ATA5590. Los resultados obtenidos por la simulación se muestran en el epígrafe 3.3.1.

### **3.3.1 Resultados de la simulación.**

En la figura 3.3 se presentan los resultados de simulación entre los que figuran las pérdidas de retorno, impedancia de entrada de la antena, razón de onda estacionaria (ROE), ganancia y directividad.

En la figura 3.3g se hace un resumen de los resultados obtenidos por la simulación, a partir de los cuales se realiza el cálculo de la eficiencia, coeficiente de transferencia de energía, máxima distancia de lectura, potencia y densidad de potencia que se recibe en la etiqueta y potencia y densidad de potencia que se recibe de retorno en el lector. El cálculo de estos parámetros se realizó utilizando el programa Matlab (Laboratorio de Matrices), la función empleada se encuentra en el anexo I y los resultados se muestran en la figura 3.3h.

La figura 3.3a muestra que la antena no alcanza el mejor valor de pérdidas de retorno en los 915 MHz, pues la parte reactiva de la impedancia de la antena difiere en magnitud de la reactancia del circuito integrado, por tanto se realiza un proceso de optimización con el objetivo de lograr un mejor acoplamiento de impedancias en la etiqueta de RFID.

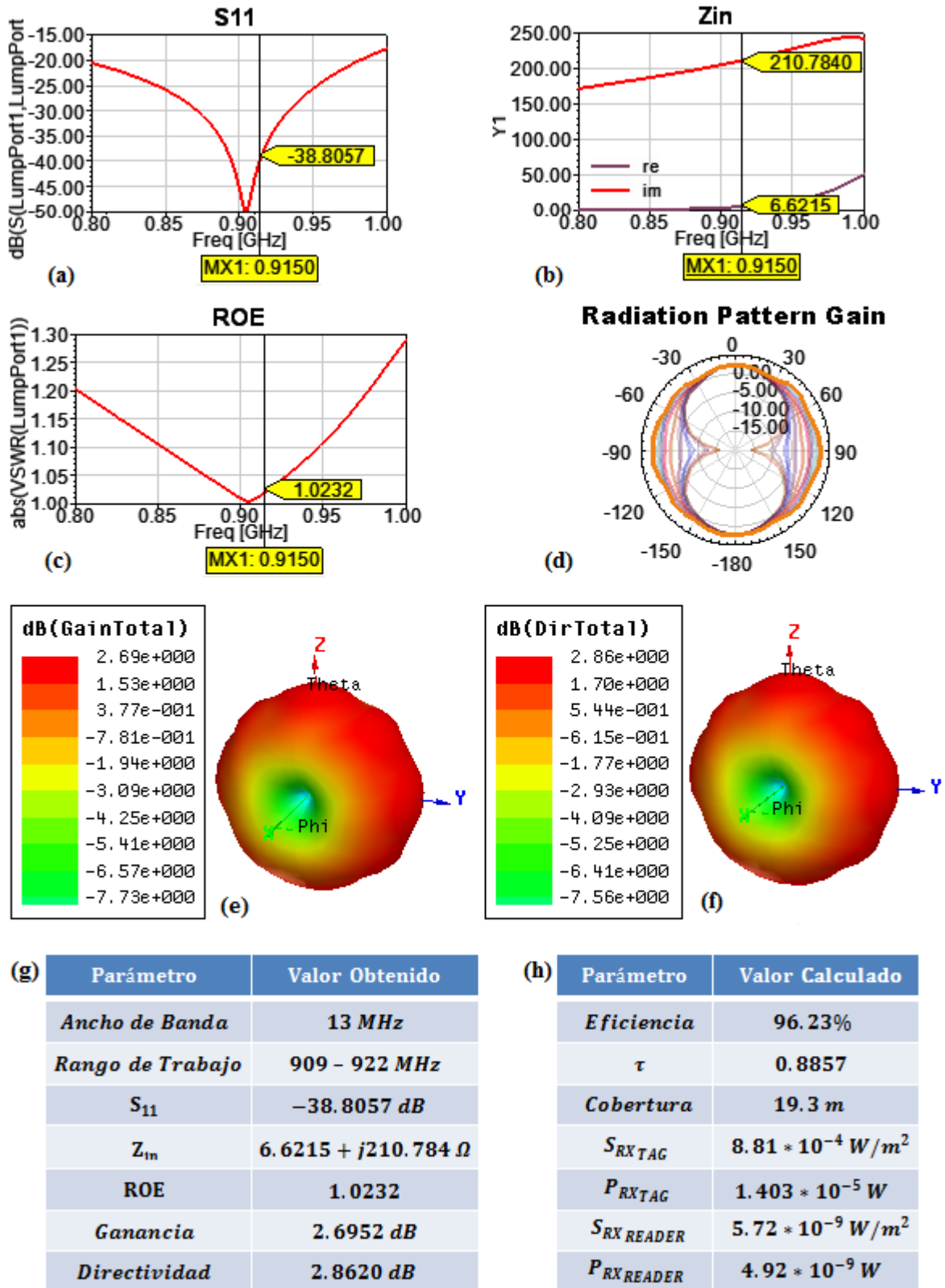


Fig. 3.3. a) Parámetro S11. b) Zin. c) ROE. d) Patrón de radiación. e) Ganancia. f) Directividad. g) Resultados obtenidos al simular. h) Parámetros más importantes calculados.

### 3.4 Proceso de Optimización.

El proceso de optimización permite modificar los parámetros de diseño, hasta obtener un modelo de la antena que cumpla los requerimientos propuestos. Este análisis evalúa el costo o error conjuntamente con las metas de optimización o función objetivo. En este caso la función objetivo se propone mejorar el acoplamiento entre la antena y el CI de tal forma que la impedancia de la antena resulte  $Z_a = 6.7 + j206 [\Omega]$ , ya que con esto algunos de los parámetros como ganancia y ancho de banda mejoran. Este proceso busca que la diferencia entre las resistencias y las reactancia respectivamente, sean mínimas en la frecuencia de resonancia de la antena, esto permite acercar el punto de resonancia a la frecuencia deseada y una disminución considerable del ROE el cual se acerca a su valor ideal.

#### 3.4.1 Análisis Paramétrico.

El análisis paramétrico define una o más variaciones de los parámetros del diseño dentro de un rango determinado, el HFSS resuelve el diseño para cada variación [28].

La parametrización de la MLA se realiza variando la separación entre el elemento serpenteado y el lazo rectangular representado por la variable *offset* y el ancho de las líneas representado por la variable *ancho\_lineas*, el ajuste de estos parámetros permite que la impedancia de la antena alcance el valor deseado. La variable *ancho\_lineas* se varía entre 0.75 – 0.85mm, mientras *offset* lo hace entre –0.5 – 0.5 mm, como se muestra en la figura 3.4.

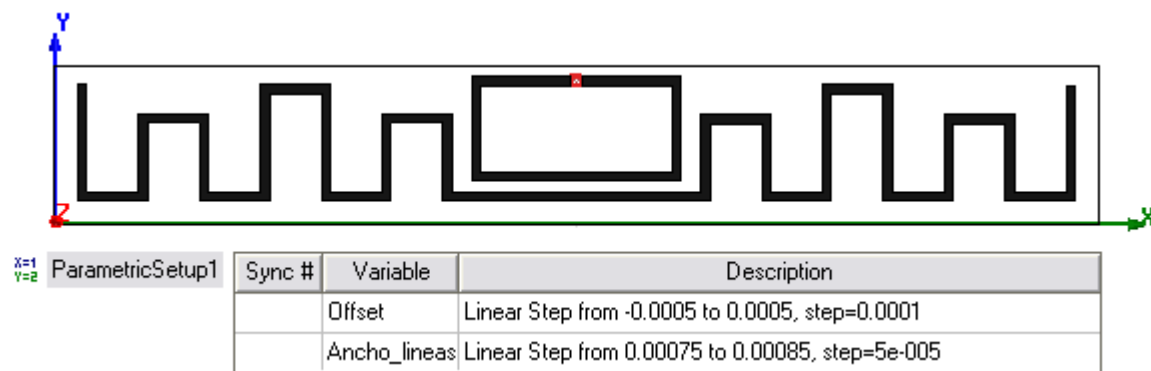


Fig. 3.4. Variación de las variables Offset y Ancho\_lineas con el análisis paramétrico.

### 3.4.2 Optimización.

La optimización permite configurar el costo y las metas de optimización, cuando la meta se satisface los valores de los parámetros de diseño se actualizan [28].

Las funciones objetivo empleadas son las siguientes:

$$Im(Z_{in}) - 206 = 0$$

$$Re(Z_{in}) - 6.7 = 0$$

El proceso de optimización calcula dimensiones para las variables *offset* y *ancho\_lineas* de 0.18503717837116 mm y 0.750839378595166 mm respectivamente con un costo de 0.039877. La simulación del diseño utilizando estos valores se muestra en la figura 3.5, los resultados obtenidos se muestran en la figura 3.6.

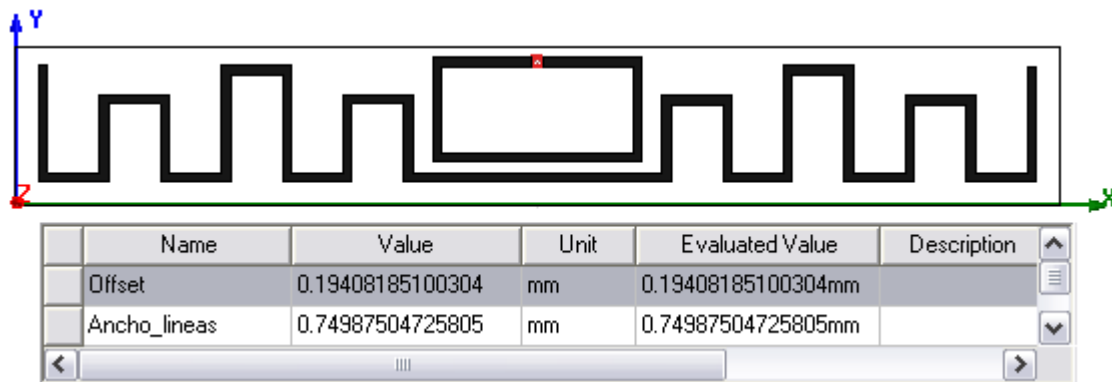


Fig. 3.5. Actualización de las variables *offset* y *ancho\_lineas*.

Después de realizar el proceso de optimización el coeficiente de transferencia de energía se acerca a su valor ideal pues el acoplamiento es casi perfecto, esto permite el incremento de la distancia de lectura hasta unos 20m, además el punto de resonancia de la antena, donde se obtienen los menores niveles de pérdidas de retorno se aproxima a los 915 MHz, por tanto en esta frecuencia la antena alcanza su máximo desempeño. Los cálculos mostrados en los cuatro campos inferiores en la figura 3.6h se realizaron para la distancia máxima de lectura (20m).



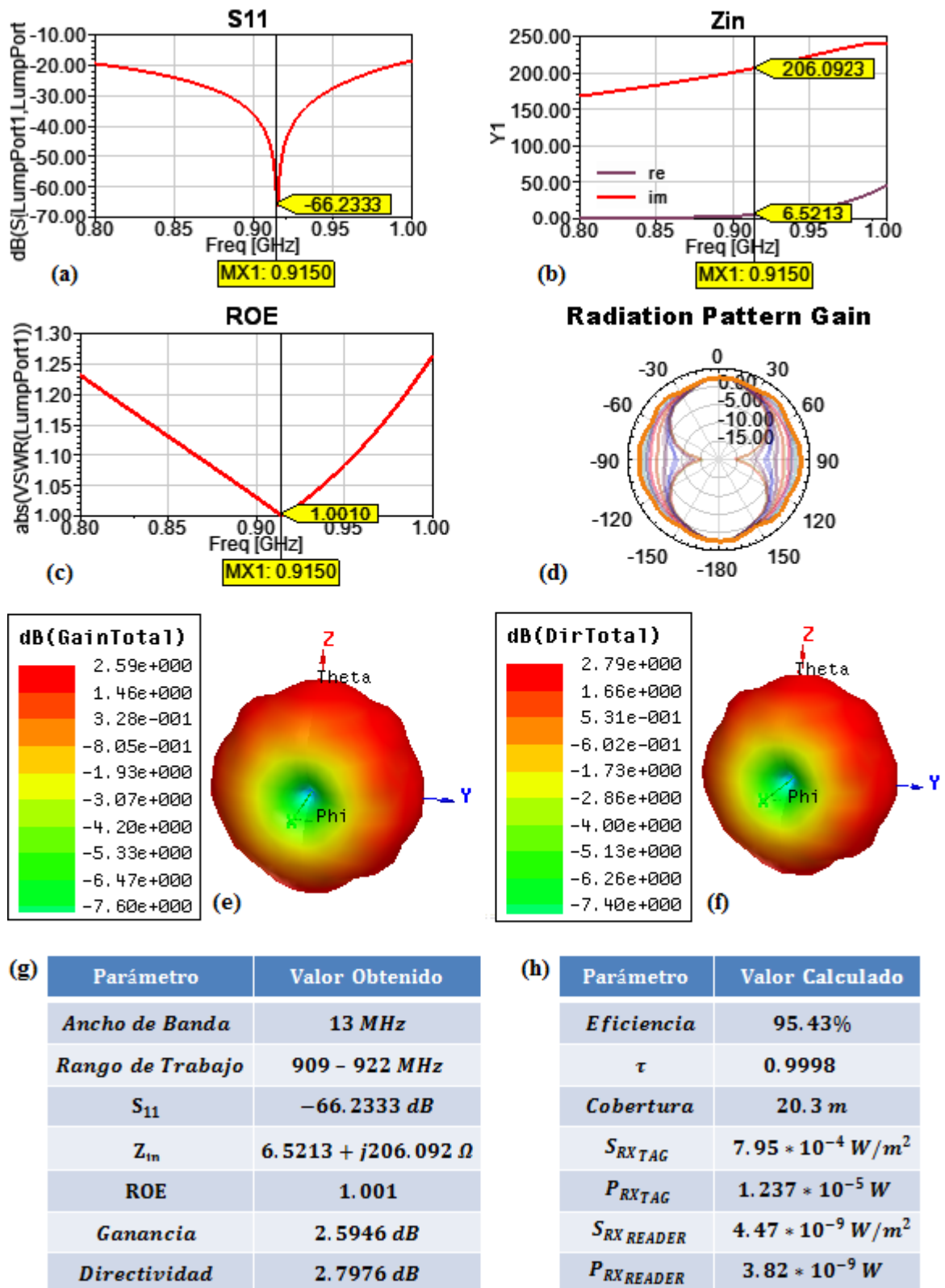


Fig. 3.6. a) Parámetro S11. b) Zin. c) ROE. d) Patrón de radiación. e) Ganancia. f) Directividad. g) Resultados obtenidos al simular. h) Parámetros más importantes calculados.

### 3.5 Requerimientos para el diseño de la FSS.

Los requerimientos que debe cumplir la superficie selectiva en frecuencia (FSS) se presentan a continuación.

Frecuencia de Operación: En el intervalo de 2 a 10 GHz

Distancia máxima de lectura: Mínimo de 2 metros.

Absorción en las frecuencias de resonancia: mayor de 0.7

Dimensiones Máximas: 1.5 x 10 cm (medida estándar de las etiquetas típicas comerciales).

Material: para la fabricación de la FSS se utilizará cobre de 0.05 mm de espesor, sobre un sustrato dieléctrico de FR4 (con una  $\epsilon_r = 4.5 - j0.088$ ), con 1.5 mm de espesor.

### 3.6 Propuesta de diseño de la FSS.

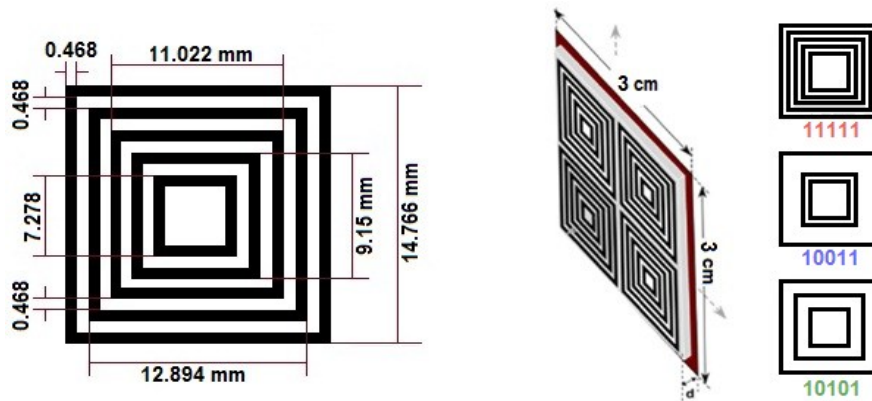
El sistema propuesto utiliza la notación o sintonía espectral para la codificación de los datos y las etiquetas no requieren de batería para operar. La etiqueta codifica datos en el espectro de frecuencia, por tanto tiene un identificador único de notación espectral. La notación espectral se obtiene interrogando la etiqueta con una señal de onda continua (CW) multi-frecuencias de fase y amplitud constantes. La etiqueta recibe la señal de interrogación y codifica los datos en magnitud y fase dentro del espectro de frecuencias.

Cuando la estructura realiza la absorción de la señal que llega desde el lector, la amplitud de la misma se atenúa y se producen saltos de fase que son detectados por el lector. Con el objetivo de proporcionar separación, entre la señal transmitida y recibida, las antenas del lector pueden utilizar polarización cruzada, esto minimiza la comunicación cruzada entre las antenas transmisoras y receptoras pero introduce restricciones en el posicionamiento y orientación de las etiquetas. El lector utiliza dos criterios para la decodificación de los datos: amplitud y fase [14]. La propuesta de diseño es la que se presenta en la figura 3.7.

La figura 3.7 muestra un modelo en tres dimensiones de la etiqueta propuesta con la configuración escogida para la realización del diseño de la FSS, donde se emplean varias celdas compuestas por lazos cuadrados concéntricos, cada lazo codifica un bit del identificador de la etiqueta. Los lazos concéntricos tienen 0.468-mm de ancho y están

separados por una abertura del mismo tamaño. Cada grupo de lazos resonantes se repite cada 15 mm (periodicidad de la estructura). El sustrato escogido es FR4 ( $\epsilon_r = 4.5 - j0.088$ ) con un espesor de 1.5 mm.

Este modelo se dibuja en el HFSS y luego se procede a realizar la simulación de la estructura periódica.



3.7. Modelo de la FSS propuesta.

### 3.7 Simulación utilizando el teorema de Floquet [29].

El teorema de Floquet se utiliza por el HFSS exclusivamente para simular estructuras periódicas planas. Principalmente arreglos planos y superficies selectivas en frecuencia como la que se muestra en la figura 3.8, cuando estas se idealizan como estructuras infinitas. El análisis de la estructura infinita se realiza analizando una celda del conjunto. Las condiciones de frontera conectadas (*Master* y *Slave*) forman las paredes laterales de la celda, este tipo de condición de frontera se utiliza para poder analizar una celda como una estructura infinita.

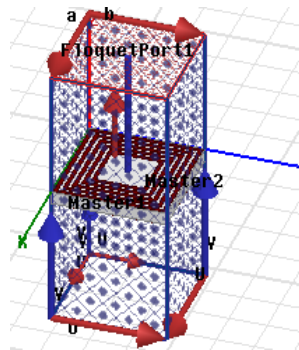


Fig. 3.8. Utilización del teorema de Floquet en la simulación de FSS.

Fundamentalmente, los modos *Floquet* son planos de ondas con dirección de propagación determinada por la frecuencia, fase y geometría de la estructura periódica, además tienen constante de propagación y sufren atenuación en baja frecuencia.

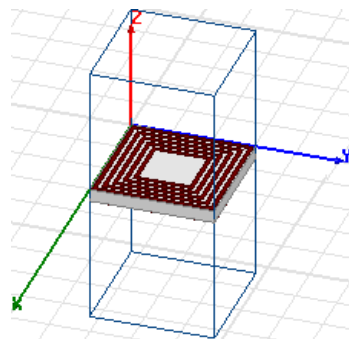
El teorema de *Floquet* describe el modo de oscilación en estructuras periódicas y establece que en un modo dado a una frecuencia determinada los campos electromagnéticos en un par de puntos separados por un período se relacionan por un factor constante. La propagación de ondas se define seleccionando un número complejo como factor constante con el objetivo de conocer la diferencia de fase de los campos en los puntos separados por un período. Como resultado directo de la solución el HFSS muestra las propiedades de reflexión y de transmisión de la FSS en términos de la matriz de dispersión calculada interrelacionando los modos *Floquet*.

### 3.8 Proceso de simulación de la FSS [29].

El proceso de construcción de la superficie selectiva en frecuencia se realiza siguiendo los pasos que se describen a continuación. 1) Dibujar el modelo geométrico. 2) Modificar los parámetros de diseño del modelo. 3) Asignar variables los parámetros de diseño 4) Asignar condiciones de frontera (*Master* y *Slave*). 5). Asignar excitación. 6) Especificar la configuración de la solución para el diseño. 7) Validar el diseño. 8) Ejecutar la simulación en HFSS. 9) Graficar los resultados.

### 3.9 Resultados de simulación de la FSS.

Siguiendo los pasos descritos en el epígrafe anterior se simula la FSS compuesta por cinco lazos cuadrados concéntricos, como se muestra en la figura 3.9. En la figura 3.10a se muestra la parte real e imaginaria de la impedancia de entrada de la HIS formada por una celda con cinco lazos cuadrados concéntricos impresos sobre un placa de FR4 con 1.5 mm de espesor.



**Fig. 3.9.** Simulación del absorbedor 5-bandas en HFSS.

La absorción perfecta se logra en cada resonancia si la parte real de la impedancia de entrada es igual a la impedancia del espacio libre, sin embargo el valor de la parte real de la impedancia de entrada no es igual para todas las resonancias. La primera resonancia se caracteriza por una parte real más alta que los de orden superior. Esto implica, según la ecuación 1.19, que la disminución del espesor del sustrato determina una disminución de la parte real de la impedancia de entrada en la primera resonancia conduciendo a un mejor acoplamiento con la impedancia del espacio libre. Inversamente, la disminución del espesor del sustrato causa una disminución del acoplamiento en las resonancias de orden superior puesto que la impedancia toma valores que se alejan de la impedancia del espacio libre.

La obtención de un buen acoplamiento para todas las frecuencias de resonancia depende en gran medida de la adecuada selección del sustrato. Con el objetivo de seleccionar un grosor de sustrato adecuado se puede realizar una simulación paramétrica tomando algunos valores de espesor del mismo cercanos a uno que conduzca a perfeccionar el acoplamiento en la resonancia fundamental. La figura 3.10b muestra el resultado de calcular las pérdidas de retorno de la estructura exponiéndose claramente la intensa absorción, mostrada en la figura 3.10c, de la señal proveniente del lector cuando impactan la superficie en cada una de las frecuencias de resonancia correspondientes a cada lazo cuadrado; codificando la cadena "11111".

La figura 3.11 muestra una comparación de la impedancia de entrada de la superficie de alta impedancia, la señal que llega de retorno al lector desde la etiqueta y la absorción realizada por la superficie a la señal que envía el lector respectivamente en cada frecuencia de resonancia para etiquetas que codifican la cadena de bits "11111", "10101" y "10011".

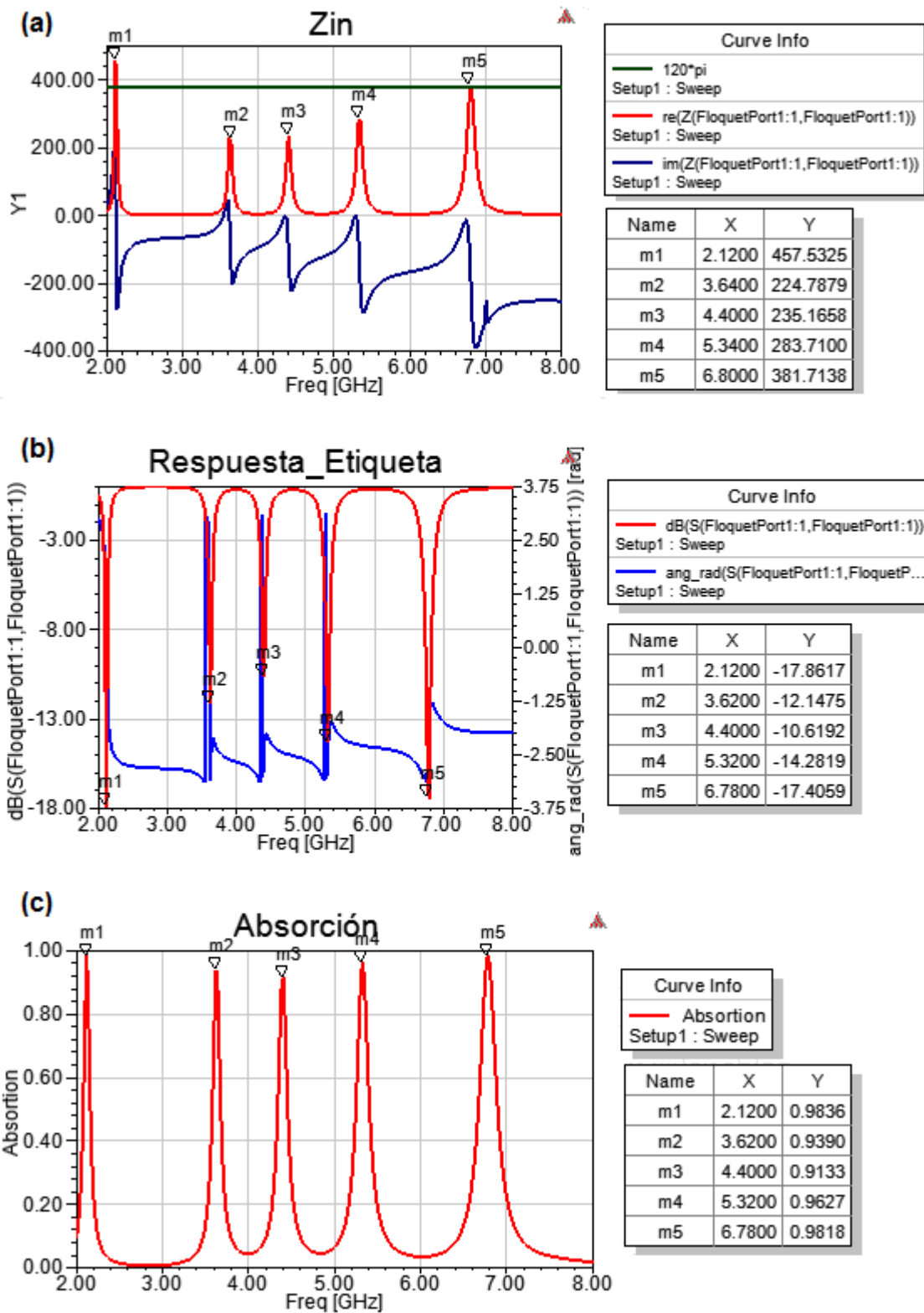


Fig. 3.10. a) Impedancia de entrada de la HIS que codifica la cadena "11111". b) Codificación de la cadena "11111". c) Absorción de la FSS en las frecuencias de resonancia.

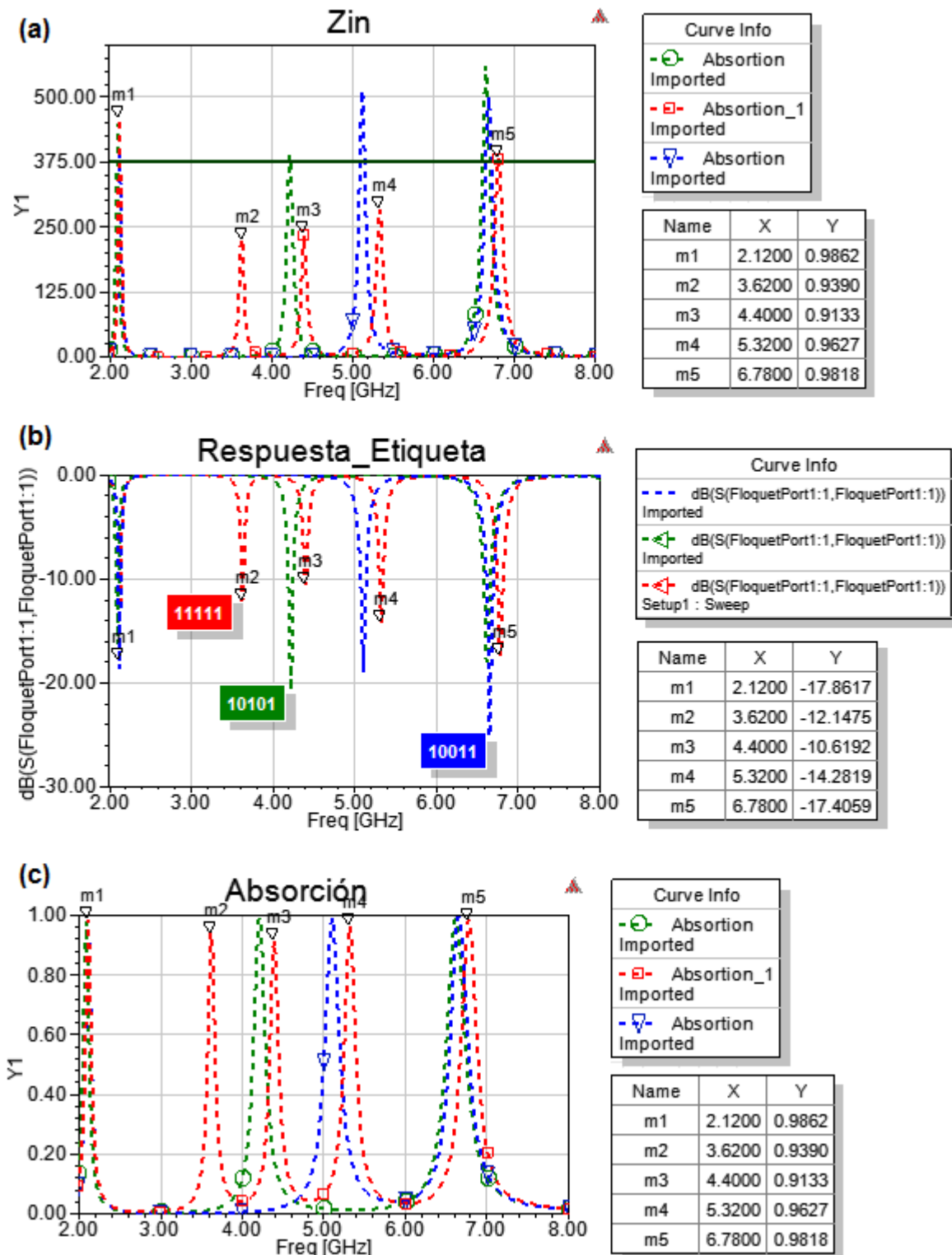


Fig. 3.11. a) Parte real de la impedancia de entrada de las HIS que codifican las cadenas "11111", "10101" y "10011". b) Codificación de la cadena "11111", "10101" y "10011". c) Absorción de la FSS en las frecuencias de resonancia.

### 3.10 Simulación de la estructura finita.

En este epígrafe se realiza el análisis de una estructura finita compuesta por un grupo de 2X2 celdas. La estructura se excita utilizando una onda incidente con intensidad del campo eléctrico  $E_0 = 1 \text{ V/m}$ , esto permite evaluar el desempeño de la FSS frente a distintos ángulos de incidencia calculándose las pérdidas de retorno para cada uno de ellos. La figura 3.12a se muestra el coeficiente de reflexión de la estructura HIS multi-resonante finita con variación angular de 0 a 45°. Como es evidente, la posición de las resonancias casi no se afecta por la variación del ángulo de incidente. Si se utiliza un dieléctrico con menor espesor y pérdidas ligeramente menores que el FR4, el pico de absorción sería estrecho y la estabilidad angular aún mejor.

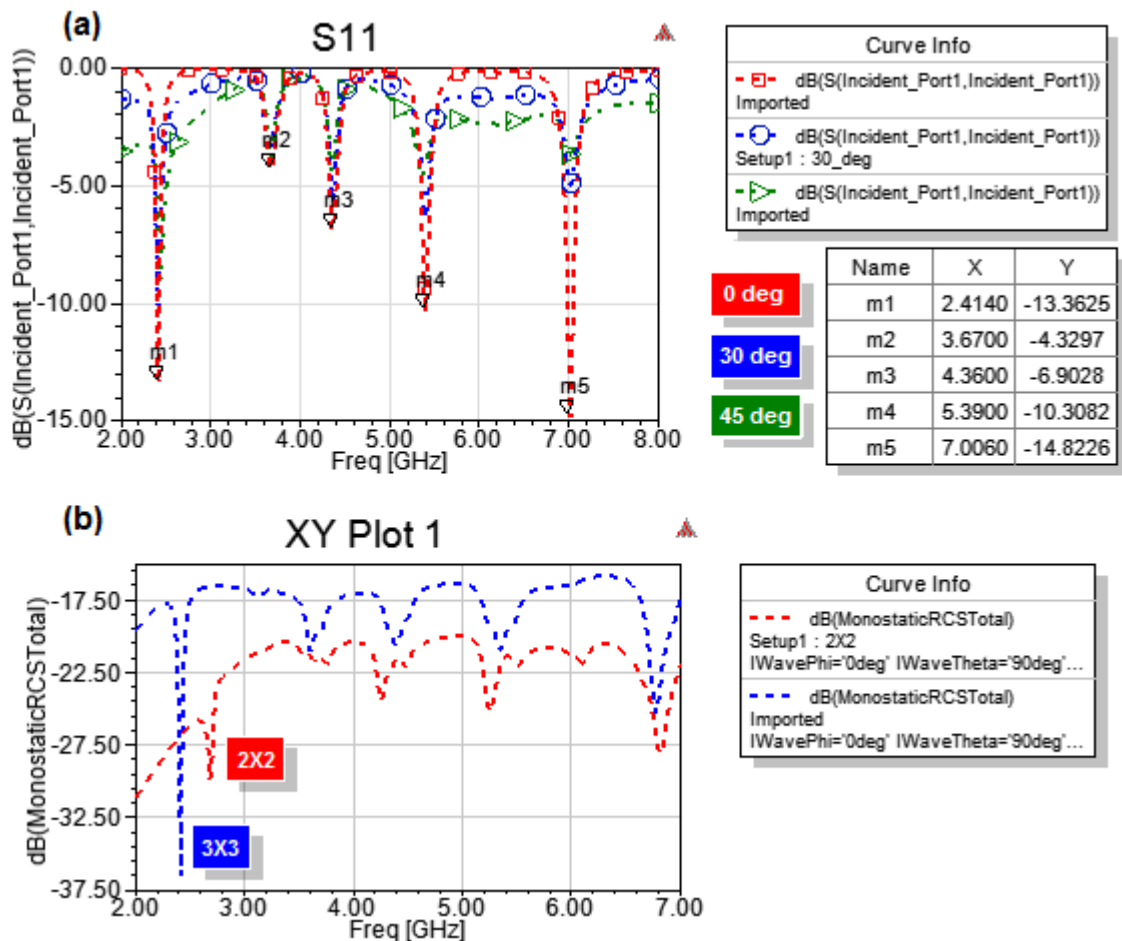


Fig. 3.12. a) Respuesta de la etiqueta frente a incidencia oblicua. b) Comparación de la señal reflejada por etiquetas formadas por 2X2 y 3X3 celdas.



En la figura 3.12b se realiza una comparación entre una etiqueta compuesta por un grupo de 2X2 celdas y otra de 3X3, calculándose la sección transversal de radar (RCS) de cada una, donde se aprecia la relación directa de la señal dispersada por la etiqueta con el tamaño de la misma, siendo la FSS de 3X3 celdas la que refleja mayor nivel de señal.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

1. Se realizó una investigación sobre los sistemas de identificación por radiofrecuencia sus características, importancia y aplicaciones.
2. Se realizó un estudio de las técnicas de diseño y simulación de las antenas lineales serpenteadas (MLAs).
3. Se diseñó una MLA con sustrato Rogert Duroit con un grosor de 1.5 mm para un dispositivo RFID pasivo que utiliza el CI ATA Atmel 5590, para operar en los 915 MHz, obteniéndose un coeficiente de transferencia de energía de 0.99998 entre la antena y el CI y pérdidas de retorno de -66 dB.
4. Se diseñó una superficie selectiva en frecuencias compuesta por celdas con cinco lazos cuadrados concéntricos sobre un sustrato de FR4 de 1.5 mm de espesor con plano de tierra. Se simuló inicialmente considerando la estructura formada por celdas infinitas, reportando cinco resonancias entre 2 y 8 GHz, con una absorción superior al 80% en las frecuencias donde se esperan las resonancias e inferior al 10% fuera de estas.
5. Se simuló la estructura finita compuesta por cuatro celdas comprobando que los resultados de la simulación infinita difieren muy poco de la finita demostrando la validez del análisis infinito para este tipo de estructuras.
6. Se realizó una comparación entre la estructura compuesta por cuatro celdas (2X2) y una formada por 9 celdas (3X3) en cuanto a la capacidad de dispersar la potencia de la señal incidente evidenciándose la relación directa de este parámetro con el tamaño de la etiqueta, pues esta última es la que refleja mayor nivel de señal, alcanzando valores superiores a  $-17.5$  dB.

### Recomendaciones

Profundizar en el estudio de los sistemas de RFID que operan en la banda de UHF.  
Profundizar en el estudio de las FSS para RFID.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. C. K. Stevan Preradovic, *Multiresonator-Based Chipless RFID*, New York: Springer Science+Business Media, 2012.
- [2] N. C. Karmakar, *Handbook of Smart Antennas for RFID Systems*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.
- [3] IEEE-USA eBooks, *The State of Radio Frequency Identification (RFID)*, Georgia : IEEE-USA Publishing Manager, 2005.
- [4] *Teledrónica, Introducción a la identificación por Radio Frecuencia - RFID*, Argentina: Teledrónica Codificación S.A., 2006.
- [5] «Savi Technologies,» diciembre 2014. [En línea]. Available: <http://www.thetrackit.com/Llibrary.php>.
- [6] A. P. M. P. V. Daniel Hunt, *RFID a Guide to Radio Frequency Identification*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.
- [7] M. D. C. D. N. J. Jari-Pascal Curty, *Design and Optimization of Passive UHF RFID Systems*, Switzerland: Editorial Springer, 2006.
- [8] P. V. N. S. F. L. K. V. Seshagiri Rao, *Antenna Design for UHF RFID Tags: A Review and a Practical Application*, 2005.
- [9] International Organization for Standardization, *ISO/IEC 18000-6:2010 Information technology, Radio frequency identification for item management*.
- [10] EPCGlobal, *EPC Radio Frequency Identity Protocols Class-1 Generation-2 UHF RFID Protocol for Communications at 860 MHz – 960 MHz Version 1.2.0*, 2008.
- [11] [En línea]. Available: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/163102/ATMEL/ATA5590.html>. [Último acceso: abril 2014].
- [12] A. L. P. d. S. Campos, *Superfícies Selectivas em Freqüência: Análise e Projeto*, Rio Grande do Norte: IFRN, 2008.

- [13] B. A. Munk, Frequency Selective Surfaces: Theory and Design, New York: John Wiley & Sons, 2000.
- [14] S. G. A. M. Filippo Costa, «A Chipless RFID Based on Multiresonant High-Impedance Surfaces,» 2013.
- [15] J. C. D. M. J. D. J. Curty, Remotely Powered Addressable UHF RFID Integrated System, 2005.
- [16] M. B. I. R. J. Uddin, UHF RFID antenna architectures and applications, Scientific Research and Essays, 2010.
- [17] D. M. Curty J. P., Design and Optimization of Passive UHF RFID System, New Jersey: Springer ISBN, 2007.
- [18] H. E. A.-R. Abdi K.H. Obsiye, Design of a Compact Planar Inverted-F Antenna (PIFA) for RFID Applications, 2008.
- [19] G. M. y. C. Calabrese, *Automatic Design of Miniaturized Slot-Line RFID Antenna*, Edimburgo, 2007.
- [20] Naobumi Michishita, Yoshihide Yamada, «A Novel Impedance Matching Structure,» de *IEEE Antennas and Propagation Society, International Symposium*, 2006.
- [21] S. R. Pavel V. Nikitin, «Antenna Design for UHF RFID Tags: A Review and a Practical Application,» 2005.
- [22] W. Choi, «RFID tag antenna with a meandered dipole and inductively coupled feed,» de *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2006.
- [23] C. A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, Third Edition ed., New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [24] H. Wolfgang, Electrical Characteristic of Transmission Lines, Artech House, 1979.
- [25] H. W. S. Wonkyu Choi, «RFID tag antenna with a meandered dipole and inductively coupled feed,» de *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2006.
- [26] ANSYS, Ansoft HFSS- User Guide, Ansys Inc.
- [27] ANSYS, Getting Started with HFSS: A Waveguide T-Junction, Ansys Inc, 2012.
- [28] ANSYS, Getting Started with HFSS: Optimizing a Waveguide T-Junction Using HFSS and Optimetrics, ANSYS, 2012.

[29] ANSYS, Getting Started with HFSS: Floquet Ports, ANSYS, 2012.

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

<b>ASIC</b>	Application-Specific Integrated Circuit
<b>ASK</b>	Amplitude Shift Keying
<b>BPSK</b>	Binary Phase Shift Keying
<b>CI</b>	Circuito Integrado.
<b>CPU</b>	Central Processing Unit
<b>CW</b>	Continuous Wave
<b>DC</b>	Direct Current
<b>EPC</b>	Electronics Product Code
<b>FSS</b>	Frequency Selective Surface
<b>HF</b>	High Frequency
<b>HIS</b>	High Impedance Surface
<b>IFA</b>	Inverted-F Antenna
<b>IT</b>	Information Technology
<b>IZ</b>	Interrogation Zone
<b>MLA</b>	Meandered Lineal Antenna.
<b>PIRE</b>	Potencia Isotrópica Radiada Efectiva.
<b>PCB</b>	Printed Circuit Board
<b>RCS</b>	Radar Cross Section
<b>RF</b>	Radio Frequency
<b>RFID</b>	Radio Frequency Identification
<b>ROM</b>	Read-Only Memory
<b>RTB</b>	Radio Frequency to Baseband
<b>SAW</b>	Surface Acoustic Wave
<b>TDR</b>	Time Domain Reflectometry
<b>TE</b>	Transverse Electric
<b>TM</b>	Transverse Magnetic
<b>UHF</b>	Ultra High Frequency
<b>VCO</b>	Voltage-Controlled Oscillator

## ANEXOS

## Anexo I. Función en Matlab para el cálculo de parámetros importantes.

```

%Eficiencia de la Antena.
GaindB=2.6952;
DirdB=2.862;
EficienciaDb=GaindB-DirdB;
Eficiencia=10^(0.1*EficienciaDb)
EficienciaPorcentaje=Eficiencia*100

% Coeficiente de transferencia de energía
Zc=6.7-1i*206;
Za=6.6215+1i*210.784;
Rc= real(Zc);
Ra= real(Za);
coefenergia= 4*Rc*Ra/ (abs(Zc+Za) )^2

%Máxima distancia de lectura.
lambda=3*10^8/ (915*10^6) ;
PIRE=4;
Gain=10^(0.1*GaindB);
tao=4*Rc*Ra/ (abs(Za+Zc) )^2;
S=10^(-1.921-3);
R=lambda*sqrt(PIRE*Gain*tao/S)/(4*pi)

factor=1;
i=1/factor;
SetiquetaArr=zeros(1,19*i);
Prx2Arr=zeros(1,19*i);
SlectorArr=zeros(1,19*i);
Prx1Arr=zeros(1,19*i);

for r=1:factor:19
%Densidad de potencia que recibe la etiqueta.
Setiqueta=PIRE/(4*pi*r^2);
SetiquetaArr(1,r*i)=Setiqueta;

%Potencia recibida por la etiqueta
ApertEquivAnt=Gain*lambda^2/(4*pi);
Prx2=Setiqueta*ApertEquivAnt;
Prx2Arr(1,r*i)=Prx2;

%Densidad de potencia que recibe el lector de regresol.
Slector=Gain*Prx2/(4*pi*r^2);
SlectorArr(1,r*i)=Slector;

%Potencia recibida por el lector de retorno.
GainLector=100;
ApertEquivLec=GainLector*lambda^2/(4*pi);
Prx1=Slector*ApertEquivLec;
Prx1Arr(1,r*i)=Prx1;

end

SetiquetaArr(1,19)
Prx2Arr(1,19)
SlectorArr(1,19)
Prx1Arr(1,19)

```

**Anexo II.** Principales características del circuito integrado Atmel ATA 5590.**Features**

- Carrier Frequency  $f_{RF}$ : UHF (800 - 1000 MHz)
- Compliant with Current and Upcoming World-wide Radio Regulations (FCC Part 15 Subpart C; EN 300 220; Draft EN 302 208-1, SRD Targeting ETSI Recommendation, Japan)
- The IC is Supporting a Data Rate Adaptation Possibility which Enables Optimal Data Rate Adjustments Considering Different RF Regulations
  - The Data Rate can be Adjusted Between 5 kbit/s to 80 kbit/s
  - The Data Rate of the Return Link is Independent of the Data Rate of the Forward Link
- Lowest RF Input Power Requirement Typically 10  $\mu$ W
- 1344-bit EEPROM Memory
  - 1024-bit User Memory
  - 320-bit System Memory (128-bit ID Page, 128-bit User System Information, 64-bit Manufacturer Information, etc.)
  - Programming of Virgin Tags Possible
  - Single Programming Does not Require Arbitration Selection
  - Anonymous Read Functions of Non-unique Data Structures
- Deterministic (Binary Tree) and Slotted Based Anti-collision Function
  - Detection Rate, e.g., in Europe up to 460 Tags/s (Based on Synchronous Mode, Full-duplex, 64 Bit ID + 40 kbit Forward/Return Link)
  - Mixture of Both Anti-collision Procedures is Possible
  - For Both Anti-collision Methods, no UID is Required
  - Pointer Based Anti-collision in Combination with the Tree Walking Possibility
- Forward Link (Interrogator to Tag)
  - DSBM as well as ASK
  - Adaptive PWM Coding; Supports Adaptive Functionality Based on Close Loop Concepts (Data Rate, Encoding Adjustments)
- Return Link (Tag to Interrogator)
  - ASK Modulation
  - PSK Modulation (to Achieve Best SNR, BER and Power Transfer Possibilities, and Best Performance in Noisy and/or Multi-reader Environments)
  - 4 Kinds of Coding: FM0, Two Kind of NRZI, 3phase1 and Subcarrier
  - Synchronous Return Link Protocol
  - Link Can Be Stopped/Interrupted at Any Time
  - Full-duplex Link Mechanism (Higher Throughput and Increased Data Robustness)
- Supports a Selectable EAS Mechanism
- Operating Range of > 4 m (TX Power 500 mW ERP/869 MHz) Possible

**Typical Applications**

- Supply Chain Management
- Asset Control
- Toll Collection
- Pallet Tracking
- Gas Cylinder Tracking

**Benefits**

- Meets User Requirements of GTAG
- Supports ISO 18000-6 FDIS Data Structures (AFI/ASF, DSFID, UID)
- Different UID Structure Handling Possible (such as AutoID Centre ePC)
- Derivative and Therefore Compatible to the Open Platform Concept AIDU



**1-kbit UHF  
R/W IDIC<sup>®</sup> with  
Anti-collision  
Function**

**ATA5590  
TAGIDU**

**Summary**

**Preliminary**

Rev. 4817AS–RFID–09/04



Note: This is a summary document. A complete document is available under NDA. For more information, please contact your local Atmel sales office.