



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

“DESARROLLO DE ANTENAS PARA LA TECNOLOGÍA DE RFID PASIVA EN LA BANDA DE UHF (902-928MHZ)”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

P R E S E N T A:

ING. FERNANDO ELISEO SOLARES ZAVALA

ASESORES:

DR. ROBERTO LINARES Y MIRANDA

DR. JOSÉ ALFREDO TIRADO MÉNDEZ

MÉXICO, Diciembre de 2011





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 17:00 horas del día 12 del mes de Diciembre del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIME-Zacatenco para examinar la tesis titulada:

**"DESARROLLO DE ANTENAS PARA LA TECNOLOGÍA DE RFID PASIVA EN
LA BANDA DE UHF (902-928 MHz)"**

Presentada por el alumno:

SOLARES

Apellido paterno

ZAVALA

Apellido materno

FERNANDO ELISEO

Nombre(s)

Con registro:

B	0	9	1	7	4	5
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA DEFENSA DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Los Directores(a) de tesis


DR. ROBERTO LINARES Y MIRANDA


**DR. JOSÉ ALFREDO TIRADO
MÉNDEZ**


DR. SUREN STOLIK ISAKINA

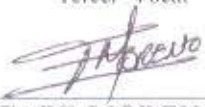
Presidencia

Segundo Vocal


**DR. JOSÉ ALFREDO TIRADO
MÉNDEZ**

Tercer Vocal

Secretario


DR. EDGARD MORENO GARCÍA


DR. RAÚL PEÑA RIVERO

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES


DR. JAIME ROBLES GARCÍA



gfk



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México el día 12 del mes Diciembre del año 2011, el (la) que suscribe Fernando Eliseo Solares Zavala alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica con número de registro B091745, adscrito a la Sección de Estudios de Postgrado e Investigación de la ESIME Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Roberto Linares y Miranda y Dr. José Alfredo Tirado Méndez y cede los derechos del trabajo intitulado Desarrollo de Antenas Para la Tecnología de RFID Pasiva en la Banda de UHF (902-928 MHz), al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección fernando.esz@gmail.com, rlinaresy@ipn.mx . Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.


Fernando Eliseo Solares Zavala

Nombre y firma

Resumen.

Los sistemas de tecnología RFID (Identificación por Radiofrecuencia) día con día tienen mayor aplicación en la identificación, control y rastreo de objetos. Estos sistemas se forman por un lector, el medio de transmisión que es el espacio libre y una etiqueta que se fija en el objeto a identificar. Existen sistemas de campo cercano y de campo lejano, de etiqueta pasiva y activa. Las etiquetas para los sistemas RFID se forman por una antena y un circuito integrado que contiene la información del objeto a identificar. Los sistemas de RFID de campo cercano utilizan el fenómeno del acoplamiento electromagnético inductivo y operan en la banda de frecuencias altas (HF) y frecuencias muy altas (VHF). La tecnología de RFID para campo lejano opera en la banda de ultra alta frecuencia (UHF) y microondas. Ambas tecnologías de RFID utilizan etiquetas activas y pasivas; las primeras requieren de una batería para funcionar y emiten constantemente energía electromagnética al medio ambiente para ser reconocidas por algún lector, su cobertura es mayor de 50m, en cambio las etiquetas pasiva sólo funciona cuando energía electromagnética le incide, es decir se alimentan con la señal de radiofrecuencia (RF). Su cobertura es menor de 20 m. Uno de los retos principales de la tecnología RFID con etiquetas pasivas es tener mayor alcance, lo cual depende de la ganancia de la antena el acoplamiento entre el circuito integrado y la antena, así como la sensibilidad del circuito integrado.

En esta tesis se describe el diseño, optimización y construcción de etiquetas pasivas para los sistemas de RFID; por lo que primero se presenta una semblanza de los sistemas de RFID para dar un marco general de la importancia del trabajo de investigación relacionado con esta tesis. Posteriormente se presenta el análisis de las etiquetas pasivas de RFID, haciendo énfasis en las características de impedancia del circuito integrado para diseñar antenas con la impedancia igual o lo más cercano a la del circuito integrado, este proceso se lleva a cabo buscando que no se degrade la ganancia de la antena. Por último se describe un proceso de optimización de los parámetros de las antenas para obtener el mejor desempeño.

Para corroborar las bases teóricas, se diseñan cuatro antenas, basadas en la técnica del serpenteo, cada antena con una ganancia aproximada de 1 dB, a las cuales se busca optimizar su acoplamiento con el circuito integrado, por medio de un programa basado en algoritmos genéticos realizado en Matlab, que se comunica con un simulador electromagnético para obtener los parámetros de cada antena. Una vez realizado el proceso de diseño, se comprueba el resultado obtenido por medio del proceso de caracterización, de tal forma que los resultados obtenidos a través de simulación computacional tengan un sustento experimental.

Abstract

The technology of RFID systems are frequently used in the objects identification, control and tracking. These systems are formed by a reader, the propagation media (the free space) and a tag that is fixed on the object to be identified. The tags for RFID systems are formed by an antenna and an integrated circuit, that contains the information of the object to identify. Some RFID systems use electromagnetic near-field inductive coupling and operating at the high frequency band (HF) and very high frequency band (VHF). The RFID technology for far field applications operates at the ultra high frequency (UHF) band and microwaves. Both technologies use RFID active and passive tags, the first requires a battery to operate and transmit electromagnetic energy continuously to the media to be recognized by a reader, that area is bigger than 50 m. However, the passive tag only works when electromagnetic energy bearing, that is fed with the signal frequency (RF). Its coverage is less than 20 m.

One of the main challenges of RFID technology with passive tags is to achieve greater operating range, which depends on the gain of the antenna, coupling between the integrated circuit and antenna, and the sensitivity of the integrated circuit.

This thesis describes the design, optimization and construction of passive tags for the RFID systems, so it is first presented a summary of RFID systems to give a general framework of the importance of the work of research related with this thesis. Secondly, we present the analysis of passive RFID tags, with emphasis based on the impedance characteristic of the integrated circuit and design antennas to match the integrated circuit. This process is carried out looking to not degrade the gain of the antenna. Finally, a process is described of the optimization of the parameters of the antenna for the best performance.

To corroborate the theoretical analysis, four antennas are designed based on the technique of meandering each antenna with an approximate gain of 1 dB, which looks for an optimization of its coupling with the integrated circuit, through a program based on genetic algorithms made in Matlab, that communicates with an electromagnetic simulator to obtain the parameters of each antenna. Once the design process is concluded, the results are verified through the characterization process, so that the outcomes are compared to those in computer simulation.

Objetivo

El objetivo de este trabajo de tesis es:

Diseño, optimización, Construcción y Caracterización de Antenas para Etiquetas de RFID Pasivas en la Banda de UHF (902-928 MHz).

Para alcanzar el objetivo principal, la tesis se dividió en los siguientes objetivos particulares:

- Análisis de antenas de RFID que operen en el intervalo de 902 a 928 MHz
- Aplicar técnicas de acoplamiento de Impedancias para lograr la máxima eficiencia de las antenas de RFID.
- Aplicar un método de optimización para mejorar el desempeño de las antenas de RFID
- Caracterizar las Antenas de RFID.

Justificación.

La tecnología pasiva de RFID, está teniendo una gran penetración en diferentes áreas de la industria y del comercio, en donde el requerimiento de alcanzar mayores distancias de lectura ha sido uno de los temas más importantes en investigación en los últimos años. Para lograr aumentar este parámetro existen varias propuestas, una de ellas es mejorar el desempeño de la antena de la etiqueta pasiva, tanto en ganancia, ancho de banda y acoplamiento con el circuito integrado de RFID. Esto debido a que dichos parámetros tienen una relación directa con el campo de operación, que permite alcanzar mayores distancias, sin aumentar la potencia del lector. Existe un compromiso en mantener un tamaño reducido y un buen desempeño, ya que se tiene que conseguir antenas de bajo costo de producción sin sacrificar el campo de operación (que en esta tecnología esta por debajo de los 20 metros), el cual depende, principalmente de los parámetros de la antena.

En general se plantean propuestas de antenas dipolo con técnicas de serpenteo, que permitan obtener altos desempeños para mejorar el campo de operación en etiquetas pasivas de RFID. Con esto se planea obtener mejores resultados en este tipo de aplicaciones, sin elevar los costos.

Índice

Resumen.....	i
Abstract.....	ii
Objetivo.....	iv
Justificación.....	iv
Índice de Figuras.....	viii
Índice de Tablas.....	ix
Acrónimos.....	x
Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1 El Sistema de la Tecnología RFID.....	3
1.1.1 Elementos del Sistema RFID.....	4
1.2 Etiquetas Pasivas de RFID.....	4
1.2.1 Componentes de una Etiqueta de RFID.....	6
1.2.2 Principio de Operación de los Sistemas Pasivos.....	7
1.2.3 Antenas en el Sistema RFID Pasivo.....	8
1.2.4 Parámetros Importantes en las Antenas de RFID Pasivas.....	9
1.3 Conclusiones.....	18
Referencias.....	19
Capítulo 2 El Diseño de Antenas para Etiquetas RFID Pasivas en la Banda de UHF.....	21
2.2 Técnicas de Miniaturización.....	22
2.1.1. Antenas Lineales Serpenteadas.....	22
2.1.2 F Invertida.....	25
2.1.3 Antenas de Ranura.....	28
2.1.4 Antenas Tipo Texto.....	29
2.1.5 Comparación de los Diseños de Antenas de RFID.....	30
2.2 Técnicas para el Acoplamiento de Impedancias.....	32
2.1.1 Acoplamiento T.....	32
2.1.2 Acoplamiento Inductivo.....	36
2.1.3 Aplicación de las Técnicas de Acoplamiento en RFID.....	41
2.3 Proceso de Diseño de las Antenas de RFID.....	41
2.3.1 Requerimientos de Operación.....	42
2.3.2 Impedancia del Circuito Integrado.....	43
2.3.3 Propuesta del Diseño de la Antena.....	44
2.3.4 Proceso de Simulación.....	45
2.3.5 Proceso de Optimización.....	48
2.3.6 Proceso de Caracterización.....	50
2.4 Conclusiones.....	54
Referencias.....	55
Capítulo 3 Propuestas de Diseño de Antenas de RFID.....	59

3.1 Requerimientos para las Antenas.....	60
3.2 Propuestas de Diseño.....	61
3.3 Optimización.....	68
3.2.1 Prueba del Algoritmo Genético.....	76
3.2.2 Optimización de las Antenas Propuestas.....	80
3.4 Conclusiones.....	85
Referencias.....	87
Capítulo 4 Caracterización de las Antenas.....	88
4.1 . Construcción de los Prototipos.....	89
4.2 Proceso de Medición de la Impedancia.....	90
4.2.1 Calibración del Sistema de Medición.....	90
4.2.2 Medición de la Impedancia.....	92
4.2.3 Análisis y Discusión de los Resultados.....	93
4.3 Medición del Patrón de Radiación y Ganancia.....	97
4.4 Conclusiones.....	102
Referencias.....	104
Conclusiones Generales.....	105
Trabajo Futuro.....	107
Bibliografía.....	108
Apéndice I. Como Crear Funciones Para la Manipulación de HFSS con Matlab.....	109
Apéndice II Configuración del Programa del Algoritmo Genético.....	113

Índice de Figuras.

Figura. 1-1 Sistema de Tecnología RFID.....	3
Figura. 1-2 Etiqueta RFID de UHF.....	6
Figura. 1-3 Componentes de una Etiqueta de RFID.....	6
Figura. 1-4 Principio de Operación del Sistema RFID.....	8
Figura. 1-5 Intercambio de datos Lector-Etiqueta [9].	8
Figura. 1-6 Circuito Equivalente del Acoplamiento de Impedancias.	13
Figura. 1-7 Impedancia de la Antena y CI y su relación con el ancho de banda de operación de la etiqueta [11].	15
Figura. 1-8 Carta de Impedancia. con el Coeficiente de Transferencia de Energía.....	16
Figura. 1-9 Relación Ganancia-Coeficiente de Transferencia de Energía, en el Campo de Lectura.....	17
Figura. 2-1 Parámetros Físicos de una MLA.	23
Figura. 2-2 . Matriz de Puntos para el diseño de MLA.....	24
Figura. 2-3 Ejemplos de MLA. Antena (a) propuesta en [15] y (b) propuesta en [4].	24
Figura. 2-4 Configuración Básica de una IFA.....	26
Figura. 2-5 Esquema General de una PIFA.	26
Figura. 2-6 Ejemplos de IFA y PIFA en RFID.	27
Figura. 2-7 Configuración de una Antena de Ranura.....	29
Figura. 2-8 Ejemplo de una Antena de Texto.....	29
Figura. 2-9 Ejemplos de Antenas de RFID. En (a) antena serpenteada y (b) antena de ranura.....	30
Figura. 2-10 Acoplamiento T.....	33
Figura. 2-11 Circuito Equivalente del Acoplamiento T.....	33
Figura. 2-12. Variación de la impedancia de la antena en relación a sus dimensiones. (a) Resistencia, (b) Reactancia.....	35
Figura. 2-13 Acoplamiento Inductivo.....	37
Figura. 2-14 Circuito Equivalente del Acoplamiento Inductivo.....	37
Figura. 2-15 Parámetros del Loop.....	38
Figura. 2-16 Variación de la impedancia de la antena en relación a sus dimensiones (a) Resistiva, (b) Reactiva.....	40
Figura. 2-17 Evolución de las Antenas de RFID.....	41
Figura. 2-18 Diagrama del Proceso de Diseño para Antenas de RFID.	42
Figura. 2-19 Método de Calibración Utilizando Conectores SMA de 50 Ω	44
Figura. 2-20 Métodos Numéricos y Programas de Simulación.....	45
Figura. 2-21 Tetraedro.....	46
Figura. 2-22 Ajuste de Mallas en el HFSS.	47
Figura. 2-23 Configuración para la Medición de Impedancia Utilizando Plano de Tierra.....	51
Figura. 2-24 Diagrama del Análisis de un Dipolo Asimétrico[48].....	52
Figura. 3-1 Reactancia Teórica al Variar los Parámetros de un Loop Rectangular.....	61
Figura. 3-2 Diseño Base para la Antena 1.....	62
Figura. 3-3 Parámetro S_{11} , del la Antena 1.....	62
Figura. 3-4 Diseño de la Antena 1, Obtenido al variar sus dimensiones.....	63
Figura. 3-5 Resultados de Simulación de la Antena 1, (a) Parámetro S_{11} , (b) Patrón de Radiación.....	64
Figura. 3-6 Antena 2. Propuesta de Diseño.	65
Figura. 3-7 Resultados de Simulación de la Antena 2, (a) Parámetro S_{11} , (b) Patrón de Radiación.....	66
Figura. 3-8 Antena 3. Propuesta con Logotipo México.....	67
Figura. 3-9 Parámetro S_{11} de la Antena "México".....	68

Figura. 3-10 Diagrama de Flujo del Programa del Algoritmo Genético.....	69
Figura. 3-11 Esquema de la Búsqueda Realizada por el Algoritmo Genético.	72
Figura. 3-12 Diagrama Esquemático de la Operación del Algoritmo Genético.....	73
Figura. 3-13 Esquema de los Genes que Conforman el Diseño de una MLA.	74
Figura. 3-14 Simulación de una Antena con Valores Dados por el Algoritmo Genético.....	74
Figura. 3-15 Datos Exportados por el Simulador.	75
Figura. 3-16 Antena 4. Generada por el Algoritmo Genetico.....	77
Figura. 3-17 Impedancia de Entrada de la Antena 4.	78
Figura. 3-18 Resultados de Simulación de la Antena 4, (a) Parámetro S_{11} , (b) Patrón de Radiación.	79
Figura. 3-19 Resultados de Simulación de la Antena 2 optimizada, (a) Parámetro S_{11} , (b) Patrón de Radiación.	82
Figura. 3-20 Antena 2 Optimizada.....	82
Figura. 3-21 Resultados de Simulación de la Antena 3 después de la Optimización, (a) Parámetro S_{11} , (b) Patrón de Radiación.	84
Figura. 4-1 Antenas Construidas sobre FR4.....	89
Figura. 4-2 Cable Semirrígido Utilizado en la Técnica de Medición Diferencial.....	90
Figura. 4-3 Método de Calibración, (a) Diagrama de Calibración del Sistema , (b) Arreglo conectado al Analizador de Redes.....	91
Figura. 4-4 Conexión de las Antenas al Arreglo.....	92
Figura. 4-5 Impedancia Medida de la Antena 1, (a) Reactancia y (b).Resistencia	94
Figura. 4-6 Impedancia Medida de la Antena 2, (a) Reactancia y (b).Resistencia.	95
Figura. 4-7 Impedancia Medida de la Antena 3, (a) Reactancia y (b).Resistencia.	96
Figura. 4-8 Impedancia Medida de la Antena 4, (a) Reactancia y (b).Resistencia.	97
Figura. 4-9 Antena con Stub Calculado para acoplar 50Ω con $6.45+j206 \Omega$	98
Figura. 4-11 Parámetro S_{11} de la Antena con el Stub.	99
Figura. 4-10 Prototipo de Antena con Stub.....	99
Figura. 4-12 Medición del Patrón de Radiación y Ganancia. (a) y (b) Antenas Separadas por a 1.5 metros, (c) Antena colocada para girar, (d) Generador de Funciones y Radiorreceptor.....	100
Figura. 4-13 Patrón de Radiación Normalizado.	101

Índice de Tablas

Tabla I Comparación de las Etiquetas Pasivas y Activas.....	5
Tabla II Circuitos Integrados Comerciales de RFID.....	14
Tabla III Comparación de Diseños de Antenas para RFID.....	31
Tabla IV Parámetros Obtenidos por Simulación de la Antena 1.....	63
Tabla V Parámetros Obtenidos de la Simulación de la Antena 2.....	65
Tabla VI Parámetros Obtenidos de la Simulación de la Antena 4.....	67
Tabla VII Pruebas Realizadas con el Algoritmo Genético.	77
Tabla VIII Parámetros de la Antena 4.	79
Tabla IX Parámetros Utilizados en la Optimización de la Antena 2.	81
Tabla X Parámetros de la Antena 2 Optimizada.....	83
Tabla XI Parámetros de la Optimización de la Antena 3.	83
Tabla XII Parámetros Obtenidos de la Antena 3, Después del Proceso de Optimización.	84
Tabla XIII Código Utilizado en Matlab Para la Generación del Código de VBS.....	110

Acrónimos.

CI	Circuito Integrado.
CW	Onda Continua.
EPC	Código Electrónico de Productos.
FTDT	Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo.
FEM	Método del Elemento Finito.
FIT	Técnica de Integración Finita.
GA	Algoritmo Genético.
HF	Alta Frecuencia.
IFA	Antena de F Invertida.
ISO	Organización de Normas Internacionales.
MLA	Antena Lineal Serpenteada.
MoM	Método de los Momentos.
NOM	Normas Oficiales Mexicanas.
PET	Tereftalato de polietileno
PIFA	Antena Plana de F Invertida.
PIRE	Potencia Isotrópica Radiada Efectiva.
RCS	Sección Transversal de Radar.
RFID	Identificación por Radiofrecuencia.
UHF	Ultra Alta Frecuencia.
VHF	Muy Altas Frecuencia.

Capítulo 1

Introducción.

La identificación por radiofrecuencia (RFID: Radio Frequency IDentification), es una tecnología que tiene aplicación en la identificación de objetos o rastreo de ellos. Esta tecnología está sustituyendo el código de barras en el control de inventarios y seguimiento de procesos industriales, así como en diferentes aspectos de la vida diaria donde se requiere control de accesos o una identificación automática [1,2,3]. Un sistema de identificación con tecnología RFID, consta de un lector, el medio de comunicación y de una etiqueta o transpondedor de RFID. La etiqueta se forma con una antena y un circuito integrado.

La tecnología de RFID opera en las frecuencias siguientes: Frecuencia Baja (LF) (Low frequency) de 125 -134 kHz; Frecuencia Alta (HF) (High Frequency) de 13.56 MHz; Frecuencia Ultra Alta (UHF) (Utra High Frequency) de 433 MHz, de 860-960 MHz; Microondas de 2.5 GHz y 5.8 GHz. Los sistemas RFID que operan en las bandas de frecuencia LF y HF, funcionan bajo el principio del acoplamiento magnético o del campo electromagnético cercano. Los sistemas que operan en las bandas de frecuencia UHF y microondas funcionan bajo el principio de acoplamiento de campo eléctrico o campo electromagnético lejano[4].

Los sistemas de identificación con tecnología RFID que operan en la banda de UHF, han alcanzado una gran popularidad debido a la identificación masiva de objetos, con un alto grado de resolución para distancias entre 3 y 100 metros. Los sistemas RFID de mayor alcance utilizan una etiqueta activa, los cuales tienen una batería para mantener una alimentación continua, por lo que emite constantemente una señal de RF con intervalos cortos de tiempo. La señal de RF está codificada y contiene la clave de la identificación del objeto, la cual se localiza con una unidad lectora. Los sistemas

de RFID con etiquetas activas son adecuados para el rastreo y para la activación o desactivación remota de sistemas. Como la etiqueta activa se alimenta con una batería, su circuito integrado puede procesar una gran cantidad de información y hasta puede tener sensores. El costo de la etiqueta activa es mayor de 20 dólares Estadounidenses.

Los sistemas de RFID para la banda de frecuencia de UHF con alcance entre 3-20 metros utilizan una etiqueta pasiva que operan en el intervalo de 860-960MHz. Esta etiqueta se llama pasiva porque normalmente está desactivada, se energiza cuando recibe señal de RF desde un lector, entonces la etiqueta responde con la información que almacena la memoria del circuito integrado. El alcance de los sistemas de RFID con etiquetas pasivas depende de la ganancia de la antena, la sensibilidad del circuito integrado y del acoplamiento antena-circuito integrado. La ventaja que presenta los sistemas RFID con etiquetas pasivas es el costo, que es alrededor de 0.2 Dólar Estadounidense, Sin embargo, el reto para su desempeño es el diseño de la antena con un acoplamiento óptimo con el circuito integrado.

En esta tesis se presenta el desarrollo de antenas para etiquetas pasivas de la tecnología RFID en la banda de frecuencia UHF de 902-928 MHz, buscando el mejor acoplamiento. Esto, con el circuito integrado, para alcanzar la máxima transferencia de energía, con el fin de alcanzar mayor distancia de detección. La tesis se divide en cuatro capítulos principales. En el primer capítulo se describen los aspectos básicos de esta tecnología, el modo de operación y los principios bajo los cuales se clasifican, tanto en frecuencia, tipo de fuente de alimentación, protocolos, entre otros. Todo esto con objetivo de dar un marco general de la problemática que se presenta en esta tesis.

En el capítulo dos se presentan los aspectos del diseño de antenas para etiquetas pasivas para RFID en la banda de UHF, las cuales cumplen con un papel importante en el desempeño del sistema[5], que se refleja en un mayor campo de lectura (distancia máxima a la cual se puede detectar la etiqueta respecto al lector) y una mejor ganancia. Del punto anterior se verán las propuestas existentes para el diseño de las antenas y las diferentes estructuras que se han estudiado para obtener antenas de tamaño reducido y con un buen acoplamiento con los circuitos integrados.

En el capítulo tres, se proponen tres diseños de antenas, cada una con características de acoplamiento diferentes, siguiendo los pasos de una metodología propuesta. Se obtendrán sus parámetros por medio de simulación antes y después de hacer la optimización correspondiente por medio de algoritmos genéticos.

Finalmente en el capítulo cuatro se caracterizarán las antenas, para comprobar que los parámetros calculados y obtenidos por medio de simulación sean correctos o cercanos a los obtenidos a través de mediciones. Otro punto importante a tratar es mostrar las metodologías de medición, ya que se pueden presentar algunas alteraciones en los resultados al realizarlas de forma convencional en este tipo de antenas.

1.1 El Sistema de la Tecnología RFID.

Como se mencionó anteriormente, la tecnología de RFID es una herramienta de almacenamiento o recuperación de datos remoto, utilizada en la identificación de objetos o animales, por medio de radio frecuencia (RF). El sistema básico se muestra en la figura 1-1, donde observamos que la interacción entre el lector de RFID y las etiquetas de RFID se da por medio de ondas radiadas.

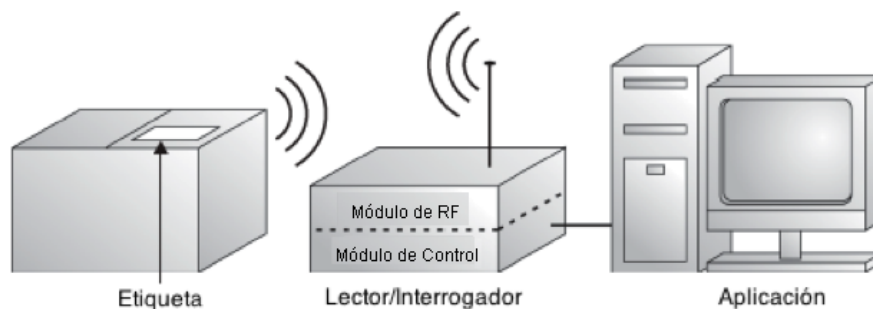


Figura. 1-1 Sistema de Tecnología RFID

Por lo tanto, para obtener un desempeño eficiente, a través de las ondas de radio, el transductor debe operar con un alto desempeño. Este transductor es la antena que permite convertir ondas guiadas a no guiadas de manera eficaz.

1.1.1 Elementos del Sistema RFID

Los elementos generales del sistema RFID son:

Etiqueta: la cual se adhiere a los objetos y es en donde se almacena la información. A la etiqueta, como tal, se le conoce al conjunto del circuito integrado y la antena, que en el caso de las etiquetas pasivas en la banda de UHF son en su mayoría dipolos [1].

Lector o Interrogador: Permite la lectura o escritura de datos de las etiquetas de RFID. Está compuesto por una antena, el módulo de RF y el módulo de control, el cual permite recibir los comandos de parte de la aplicación cargada a una computadora. En los sistemas pasivos proveen la energía a las etiquetas [1].

Un sistema RFID puede consistir en varios lectores de RFID dispuestos en una línea de proceso o una bodega para el control de inventarios.

1.2 Etiquetas Pasivas de RFID.

En la norma ISO/IEC 19762-3 se define la etiqueta pasiva como “un dispositivo RFID que refleja y modula la señal portadora proveniente del lector”[6]. Las etiquetas pasivas no cuenta con su propia fuente de alimentación (no tiene batería). Obtiene la energía del lector, por medio de las señales de radio frecuencia que éste envía, por ello sólo puede operar cuando se encuentran en el campo de lectura de lector. Algunas de las ventajas de estas etiquetas son su bajo costo y una vida útil de más de 20 años, y sus desventajas en comparación a las activas es su reducido campo de lectura.

Tabla I Comparación de las Etiquetas Pasivas y Activas

Parámetros.	Pasivas	Activas
Fuente de Alimentación	Señal de RF del lector	Interna de la Etiqueta
Batería	NO	SI
Costo	0.20 a 0.5 dólares	Más de 20 dólares
Vida Útil	Más de 20 Años	De 2 a 5 Años
Campo de Operación	10cm a 20 m	De 100 a 225m
Almacenamiento de Datos	128 Bytes de Lectura/Escritura	Arriba de 128Kb de Lectura/Escritura.

En la tabla 1.1 se muestran los parámetros más importantes que diferencian a las etiquetas de RFID pasivas y activas. En los primeros dos puntos se encuentra el elemento que les da su definición, las activas cuentan con una batería por lo que se dice que siempre están emitiendo una señal de RF, a diferencia de las pasivas que responden cuando están al alcance del lector que les brinda la energía. Siguiendo con los demás parámetros, observamos que las activas tienen mejor desempeño en cuanto a memoria y campo de operación, pero debido a su costo más elevado y con una vida útil menor, no tienen una penetración tan grande en el mercado [7].

La función básica de una etiqueta RFID es almacenar datos y transmitirlos a un lector, su definición más general es “Pequeño circuito de comunicación móvil integrado a un elemento radiador” [8], El esquema mas básico consiste en un circuito integrado y una antena (figura 1-2). En donde el circuito integrado se encarga de almacenar la información que será leída [4]. Estas etiquetas son adheridas a los objetos, con diferentes características (tamaño, forma), por lo que en la mayoría de los casos son flexibles.

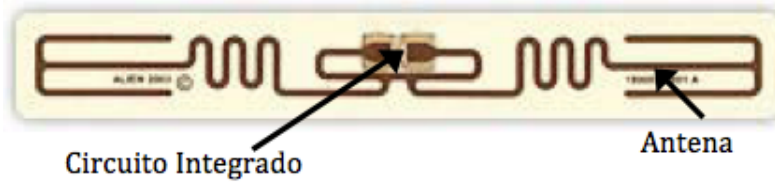


Figura. 1-2 Etiqueta RFID de UHF.

1.2.1 Componentes de una Etiqueta de RFID

Aunque la antena y el circuito integrado son los componentes principales, existen otros elementos que en su conjunto forman a las etiquetas de RFID, estos elementos se aprecian en la figura 1-3.

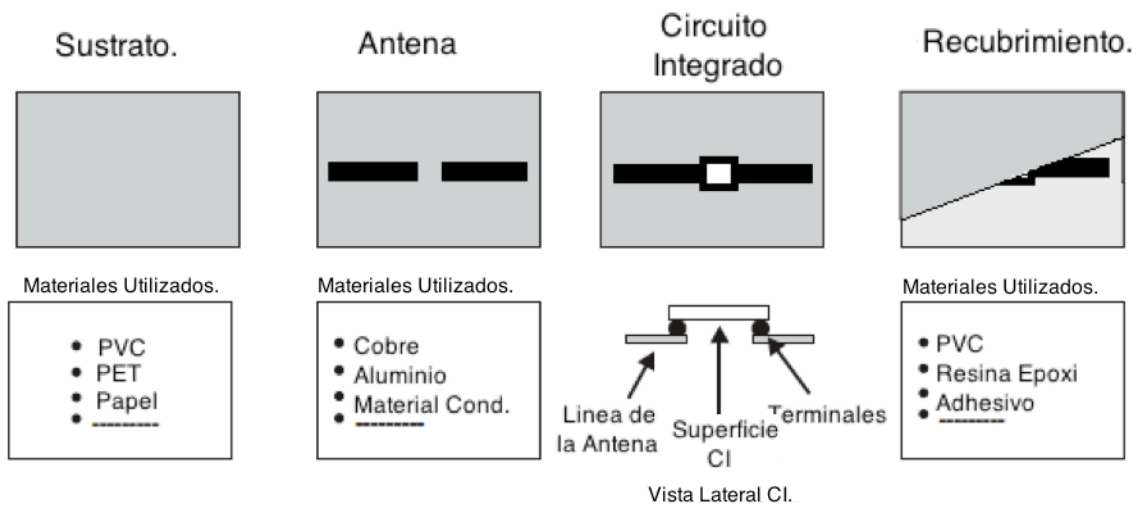


Figura. 1-3 Componentes de una Etiqueta de RFID.

En la figura 1-3, observamos que se tiene un sustrato, el cual sirve de base para los elementos de la etiqueta, el segundo elemento es la antena, la cual puede estar construida ya sea de cobre, aluminio u otros elementos conductores, el siguiente elemento es el circuito integrado, el cual se conecta a la antena y que como se

mencionó anteriormente es el elemento que almacena la información del objeto al cual se adhiere la etiqueta. Por último, se encuentra un elemento de recubrimiento que protege a los componentes que forman a la etiqueta, que en algunos casos es un adhesivo que permita colocarla sobre diferentes objetos.

1.2.2 Principio de Operación de los Sistemas Pasivos.

Las etiquetas pasivas de RFID en la banda de UHF son de acoplamiento eléctrico, por lo que operan en el denominado campo lejano, aunque mas específicamente operan bajo el principio del fenómeno de Backscattring o modulación de la sección transversal de radar (RCS por sus siglas en inglés) [3], esta técnica permite establecer la comunicación entre el lector y la etiqueta basándose en el principio de la reflexión de las ondas electromagnéticas. Un esquema básico del backscatering se muestra en la figura 1-4.

En el proceso, el lector envía una serie de señales moduladas, el campo eléctrico de la señal incrementa la diferencia de potencial a través de la antena de la etiqueta que causa que la corriente fluya, esto alimenta al circuito integrado que hace variaciones en su impedancia (resistiva o reactiva dependiendo el tipo de modulación), lo que genera una señal de respuesta retrodispersada (backscatter). En cada variación de impedancia cabe destacar que la etiqueta presenta un cierto RCS.

El intercambio de datos entre la etiqueta y el lector puede emplear diferentes tipos de modulación y codificación (por ejemplo en amplitud y codificación Manchester) [9]. En la figura 1-5, observamos que se tiene un periodo con una onda continua (CW) y otro periodo con respecto al tiempo, donde existe una señal modulada (Solicitud de Respuesta). Es durante el periodo de la señal continua, que la etiqueta envía su respuesta (en caso de estar en el campo de operación), esto por medio de la técnica de retrodispersión, explicada anteriormente, donde por medio de la variación de la impedancia, se varia el RCS.

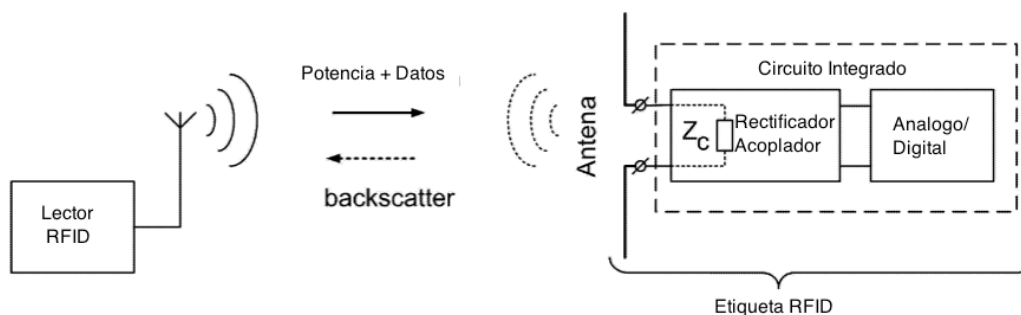


Figura. 1-4 Principio de Operación del Sistema RFID.

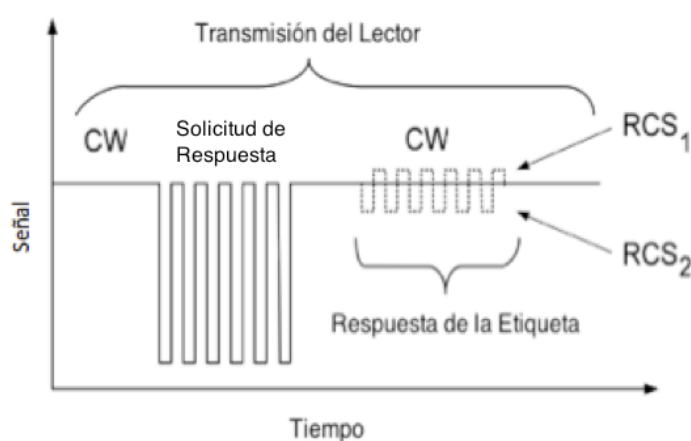


Figura. 1-5 Intercambio de datos Lector-Etiqueta [9].

1.2.3 Antenas en el Sistema RFID Pasivo.

La antena de RFID es el elemento fundamental que permite la comunicación de la etiqueta con el lector, existen diversos tipos de antenas que se utilizan para etiquetas pasivas, el tipo de antena esta relacionado con su aplicación, debido a factores como, el tipo de material al cual se adherirán, si se requiere que sea directiva o no, entre otras características que pueden influir en el tipo de antena [10].

Las funciones de la antena son las siguientes [8]:

- Recibir la energía que envía el lector (onda electromagnética) , para alimentar al CI.
- Recolectar la señal modulada, que será procesada por el CI.
- Enviar la señal de respuesta (por medio de retrodispersión)

El tipo de antena depende de la banda de frecuencia. Esto se debe a que los sistemas LF y HF utilizan el acoplamiento magnético y las antenas de la banda de UHF y Microondas son de acoplamiento eléctrico por lo que generalmente se utilizan antenas tipo dipolo.

Debido a la longitud de onda en la banda de UHF, las antenas para estos sistemas son más pequeñas que las fabricadas para LF y HF. Además, como generalmente las etiquetas se adhieren a objetos de diferente forma y tamaño, y se tiene un compromiso de obtener antenas económicas, las dimensiones de la antena deben ser menores a media longitud de onda, por lo que en muchos casos se aplican técnicas de miniaturización [8].

1.2.4 Parámetros Importantes en las Antenas de RFID Pasivas.

1.2.4.1 Campo de Lectura.

La distancia máxima de lectura es claramente uno de los parámetros más importantes en la tecnología RFID. Parte el objetivo de este trabajo se centra en mejorar este parámetro.

Por medio de la ecuación de Friis en el espacio libre tenemos que [11].

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

Donde:

r	Distancia máxima de operación
$P_t G_t = \text{PIRE}$	P_t es la potencia y G_t la ganancia de la antena del lector.
λ	Longitud de Onda.
G_r	Ganancia de la antena de la etiqueta.
P_{CI}	Potencia necesaria para alimentar el circuito integrado de la etiqueta o su sensibilidad.
τ	Coefficiente de transferencia de energía

Donde el coeficiente de transferencia de energía es:

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

Donde:

$Z_c = R_c + jX_c$ impedancia del circuito integrado de la etiqueta.

$Z_a = R_a + jX_a$ impedancia de la antena de la etiqueta.

De (1.1) podemos calcular el campo de operación y observamos que depende en gran medida de las características de las antenas tanto del lector como de la etiqueta, así como de la sensibilidad del circuito integrado de RFID. Aunque de estos parámetros, tenemos que la PIRE conformada por la ganancia y potencia del lector, se limitan por las normas de cada región, y la sensibilidad del circuito integrado depende del fabricante, por lo que se puede decir que los parámetros de la antena de la etiqueta es un punto fundamental para mejorar la operación del sistema RFID.

Comúnmente, el tamaño de la antena es relevante para la frecuencia de operación. Pero en la mayoría de los casos, el tamaño de la antena es reducido para minimizar el tamaño de la etiqueta. Esto nos muestra que para trabajar a una

frecuencia dada se debe considerar, la ganancia de la antena y el tamaño requerido para la etiqueta.

1.2.4.2 Ganancia.

Para mejorar el campo de lectura se tienen diferentes aspectos a considerar. El primer punto importante es la ganancia de la antena, la cual se define como “razón de la intensidad de radiación en una dirección dada respecto a la intensidad radiación que sería obtenida si la potencia aceptada por la antena fuera radiada de manera isotrópica” [12]. Teniendo la potencia de transmisión del lector establecida, el campo de lectura máximo está limitado por la ganancia de la antena de la etiqueta y la frecuencia de operación. Por medio del análisis del enlace entre la etiqueta y el lector, en donde tenemos una onda electromagnética transmitida en un espacio con pérdidas y la respuesta de la etiqueta, podemos describir este último. Suponiendo que la energía de RF que recibe la etiqueta puede ser re-radiada totalmente en el espacio, tenemos que la potencia transmitida por el lector es P_{Tx}^{lector} y la ganancia del lector es G_{lector} , se puede expresar que la densidad de potencia en la etiqueta a una distancia R es:

$$S_1 = \frac{G_{lector} P_{Tx}^{lector}}{4\pi R^2} \quad (1.3)$$

La potencia recibida por la etiqueta es:

$$P_{Rx}^{etiqueta} = S_1 A_{etiqueta} \quad (1.4)$$

Donde la apertura equivalente de la antena de la etiqueta ($A_{etiqueta}$) está dada por:

$$A_{etiqueta} = \frac{G_{etiqueta} \lambda^2}{4\pi} \quad (1.5)$$

Donde $G_{etiqueta}$ es la ganancia de la etiqueta y λ la longitud de onda.

Entonces tenemos:

$$P_{Rx}^{etiqueta} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_{lector} G_{etiqueta} P_{Tx}^{lector} \quad (1.6)$$

En donde, $P_{Rx}^{etiqueta}$ representa la potencia de recepción de la etiqueta, P_{Tx}^{lector} la potencia de transmisión del lector y G_{lector} la ganancia del lector.

La densidad de potencia de la señal de retorno de la etiqueta al lector es:

$$S_2 = \frac{G_{etiqueta} P_{Rx}^{etiqueta}}{4\pi R^2} \quad (1.7)$$

Así, la potencia recibida por el lector es

$$P_{retorno}^{lector} = S_2 A_{lector} = S_2 G_{lector} \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (1.8)$$

Eso es

$$P_{retorno}^{lector} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^4 G_{lector}^2 G_{etiqueta}^2 P_{Tx}^{lector} \quad (1.9)$$

Donde G_{lector} representa la ganancia de la antena del lector, A_{lector} es la apertura equivalente de la antena lectora, $G_{etiqueta}$ la ganancia de la antena de la etiqueta y R la distancia existente entre la antena del lector y la antena de la etiqueta.

Como sabemos la P_{PIRE} (Potencia Isotrópica Radiada Efectiva) esta dada por:

$$P_{PIRE} = G_{lector} P_{Tx}^{lector} \quad (1.10)$$

Entonces

$$P_{retorno}^{lector} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^4 G_{etiqueta}^2 G_{lector} (P_{PIRE}) \quad (1.11)$$

Por lo que por medio de este análisis observamos, que si consideramos, que la ganancia y potencia del lector están limitadas por las normas de cada país, la mejora en desempeño sigue dependiendo de la ganancia de la etiqueta, debido a que en (1.10)

la potencia que recibe el lector tiene una relación directa con la ganancia de la etiqueta, en este caso de su antena.

1.2.4.3 Acoplamiento de Impedancias.

Otro parámetro que tiene una influencia directa en el campo de lectura, es el acoplamiento de impedancias entre la antena y el circuito integrado. Este parámetro determina la operación del CI, ya que es alimentado directamente por la energía que recibe la antena, por lo que es de suma importancia que se tenga la máxima transferencia de energía. El circuito equivalente se muestra en la figura 1-6.

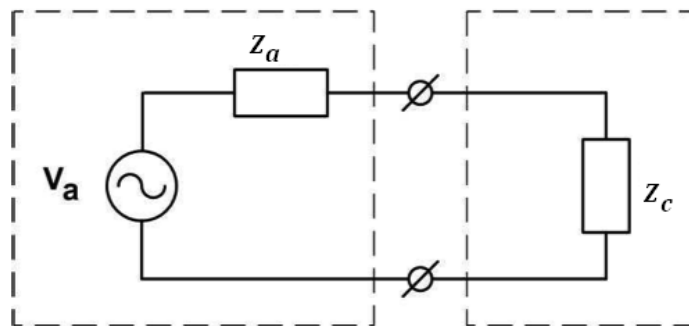


Figura. 1-6 Circuito Equivalente del Acoplamiento de Impedancias.

Para maximizar la transferencia de energía entre la antena y el CI, la impedancia de la antena debe ser igual o lo mas aproximada a la impedancia del CI. En el caso de los circuitos de RFID, la impedancia varia en cada fabricante. En la tabla 1-2 se muestran cuatro modelos de CI de RFID, en donde apreciamos que cada fabricante maneja diferentes valores de impedancia, aunque el protocolo de comunicación sea el mismo [3].

Tabla II Circuitos Integrados Comerciales de RFID

Modelo	Impedancia de Entrada a 915MHz
Texas Instruments Gen 2	13.5-j60
Philips EPC 1.19 Gen 2	17.5-j332.6
Atmel ATA5590	6.7-j206
ST XRA00	6.7-j198

Para lograr el acoplamiento, el diseño de la antena juega un papel fundamental, ya que por medio de su diseño se debe obtener la impedancia que se acople al CI, con el fin de evitar el uso de algún elemento externo que incremente el costo. Para comprender mejor la importancia del acoplamiento, en la figura 1-7, en la parte superior observamos las curvas de impedancia tanto de la antena como del CI, donde R_a es la parte resistiva de la antena y X_a la reactiva, R_c la resistiva y X_c la reactiva del CI, podemos ver como en caso de tener una carga de 50Ω la resonancia se presenta en una frecuencia menor al intervalo de operación propio de la etiqueta, la cual se presenta en el punto donde tanto la parte resistiva y reactiva de los dos elementos se acoplan. En la parte inferior se muestra como el ancho de banda de operación se da a partir del acoplamiento de impedancias.

Para cuantificar el acoplamiento existente, analizamos el circuito equivalente de la figura 1-6 donde:

$$Z_c = R_c + jX_c \quad \text{impedancia del circuito integrado.}$$

$$Z_a = R_a + jX_a \quad \text{impedancia de la antena.}$$

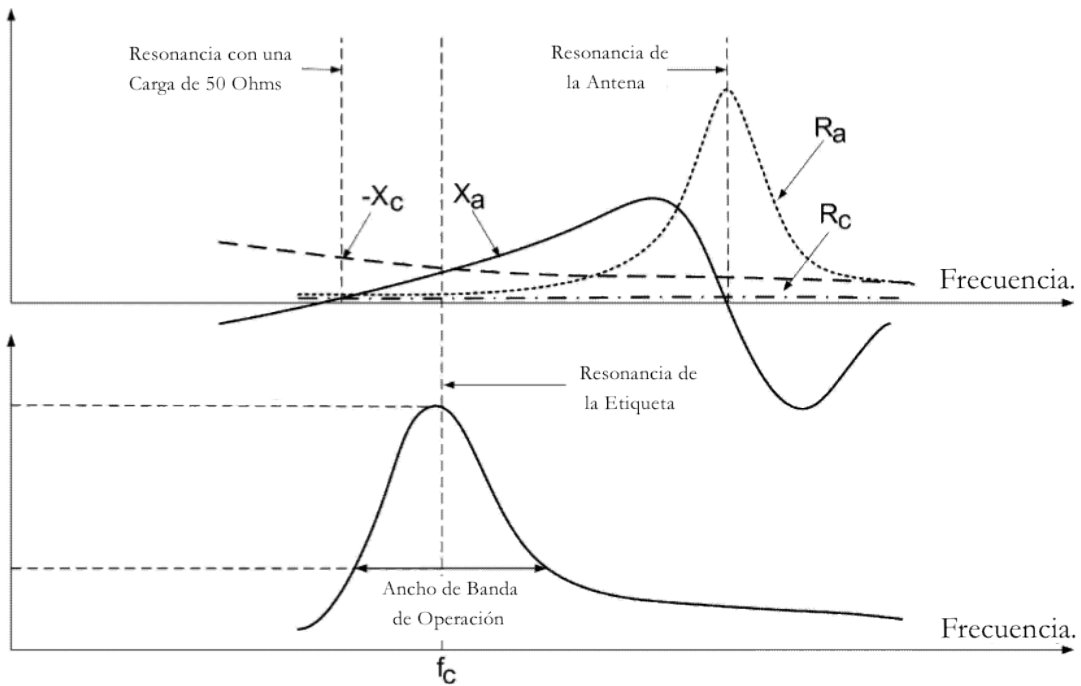


Figura. 1-7 Impedancia de la Antena y CI y su relación con el ancho de banda de operación de la etiqueta [11].

La potencia disponible P_c , que recibe el CI de la antena esta dada por:

$$P_c = P_a \tau \quad (1.12)$$

Donde P_a es la potencia máxima disponible en la antena y τ es el coeficiente de transferencia de energía expresado en (1.2), el cual puede ser graficado por medio de una carta de impedancia compleja. El coeficiente de transferencia de energía, caracteriza directamente el acoplamiento entre la antena y el CI [13].

Normalizando (1.2) tenemos:

$$\frac{4}{\tau^2} (1 - \tau) = \left[r_a - \left(\frac{2}{\tau} - 1 \right) \right] + [x_a + q_c]^2 \quad (1.13)$$

Donde:

$$x_a = \frac{X_a}{X_c} \quad \text{Reactancia normalizada.}$$

$$r_a = \frac{R_a}{R_c} \quad \text{Resistencia normalizada}$$

$$Q_c = \frac{X_c}{R_c} \quad \text{Factor de resonancia del CI para una frecuencia dada y una potencia recibida.}$$

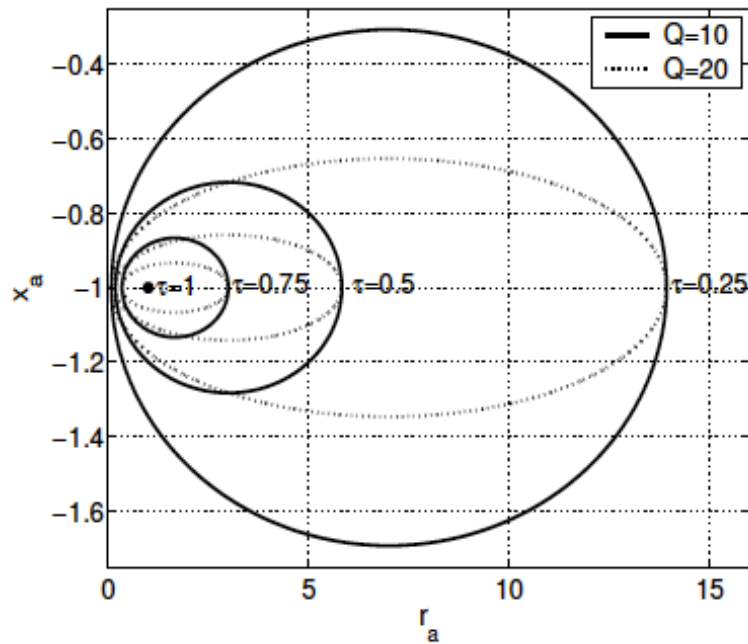


Figura. 1-8 Carta de Impedancia. con el Coeficiente de Transferencia de Energía

En la figura 1-8, el eje “x” expresa la resistencia normalizada r_a llamada la línea resonante, mientras el eje “y” es la reactancia normalizada llamada la línea de desacoplamiento. Los círculos representan el coeficiente de transferencia de energía τ , que mientras decrece el radio del círculo, el coeficiente de transferencia de energía incrementa. Obviamente cuando $\tau = 1$ se tiene un acoplamiento perfecto y cuando $\tau \rightarrow 0$ se tiene el mayor desacoplamiento.

1.2.3.4 Relación Ganancia-Acoplamiento en el Campo de Lectura.

Como se mencionó la ganancia de la antena y el acoplamiento de impedancias entre la antena y el CI tienen una relación directa con el campo de lectura. En la figura 1-9, se observa la influencia que tienen estos parámetros:

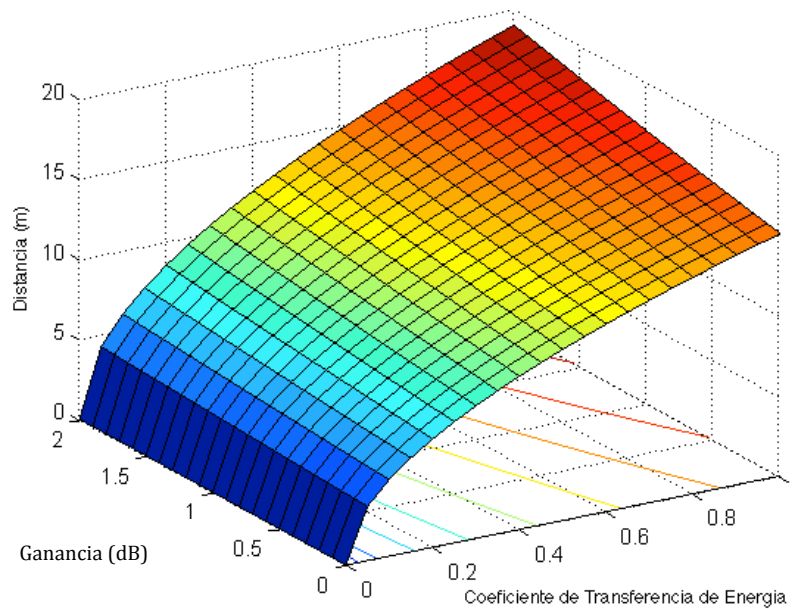


Figura. 1-9 Relación Ganancia-Coeficiente de Transferencia de Energía, en el Campo de Lectura.

Para la figura 1-9, en (1.2) se limita la energía máxima que puede radiar el lector de RFID, como lo marca la norma oficial mexicana NOM-121 de la comisión federal de comunicaciones [14] que especifica 4 W PIRE, la sensibilidad del circuito integrado se toma de la hoja de datos del modelo Atmel ATA5590 [15], el cual nos señala que es de $12 \mu\text{W}$.

En la figura 1-9, podemos observar como incrementa el campo de lectura, conforme mejora la ganancia y el acoplamiento respectivamente. Por lo que entre mas ganancia y mejor acoplamiento, se pueden obtener distancias de hasta 20 m.

1.3 Conclusiones.

En este capítulo vemos que el sistema RFID consta de dos elementos esenciales, el lector y la etiqueta, de los cuales, en la tecnología pasiva en la banda de UHF, la etiqueta depende de la energía que recibe del lector de RFID, para que por medio del fenómeno de la retrodispersión envíe una señal de respuesta.

Otro punto importante que se puede apreciar en este capítulo, es la importancia que tienen las etiquetas en el funcionamiento del sistema RFID, en donde el campo de lectura (que determina la distancia máxima a la cual la antena puede responder) depende de tres elementos: el lector, el circuito integrado y la antena de la etiqueta, de los cuales, la potencia del lector es limitada por la norma de cada región (4W PIRE en México) y las características del CI dependen del fabricante. Por lo que la antena de la etiqueta juega un papel importante, debido a que se debe acoplar a los circuitos integrados existentes y a su vez tener una ganancia aceptable, para obtener así, la mejor respuesta del sistema en general.

Referencias.

- [1] K. Finkenzeller, "RFID Handbook". *Wiley & Son*, Nw York, 2000.
- [2] R. Bansal, "Coming soon to a Walt-Mart near you," *IEEE Antenas Propagation.*, pp. 105-106, Diciembre 2003.
- [3] Jari-Pascal Curty, Michel Declercq, Catherine Dehollain, and Norbert Joehl, "Design and Optimization of Passive UHF RFID Systems". *Editorial Springer*, Lausanne, Switzerland, 2006.
- [4] V. Daniel Hunt, Albert Puglia, and Mike Puglia, "RFID a Guide to Radio Frequency Identification" *John Wiley & Sons*, New Jersey, 2007.
- [5] Foster P and Burberry. R, "Antenna problems in RFID system," *IEE Colloquium on RFID Technology*, pp. 3/1-3/5, Enero 1999.
- [6] ISO/IEC, Information Technology AIDC Techniques- Harmonized Vocabulary, Part 3- Radio-Frequency Identification (RFID), 2007.
- [8] Tan-Phu Vuong, Vincent Beroulle Smail Tedjini, "Antennas for RFID Tags," in *sOc-EUSAI conference*, Grenoble, 2005.
- [7] Technologies, Savi. thetrackit. [Online]. <http://www.thetrackit.com/Library.php>
- [9] K. V. S. Rao Pavel V. Nikitin, Theory and Measurement of Backscattering from RFID Tags, 2006.
- [10] B.R.A F.P.R, "Antenna Problems in RFID Systems," *IEE Colloquium*, pp. pp 1-5, 1999.
- [11] Pavel V. Nikitin, Sander F. Lam K. V. Seshagiri Rao, "Antenna Design for UHF RFID Tags: A Review and a Practical Application," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 12, 2005.
- [12] IEEE Estándar Definitions of Terms for Antennas, "IEEE Estándar Definitions of Terms for Antennas," 1983.
- [13] Pavel V. Nikitin, Sander F. Lam K.V.S. Rao, "Impedance Matching Concepts in RFID Transponder Design," *Intermec Technologies Corporation.*, Octubre 2005.
- [14] Comision Federal de Telecomunicaciones, Norma Oficial Mexicana NOM-121-SCT1-2009, Telecomunicaciones-Radiocomunicación-Sistemas de radiocomunicación que emplean la técnica de espectro disperso- Equipos por salto de frecuencia y por

modulación digital a operar en las bandas 902-928 MHz, 2400-2483.5 MHz y 5725-5850 MHz- Especificaciones, límites y métodos de prueba., June 21, 2010.

[15] <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/163102/ATMEL/ATA5590.html>,

Consulta realizada el 14 de Abril de 2010

Capítulo 2

El Diseño de Antenas para Etiquetas RFID Pasivas en la Banda de UHF.

En este capítulo se verán los avances en el diseño de antenas para etiquetas pasivas de RFID, en donde el objetivo principal es el de obtener la máxima transferencia de energía[1]. En la tecnología RFID pasiva de UHF, el reto recae en que la impedancia de los CI no es de 50 o 75 Ω [1], si no que la mayoría de los CI de RFID tienen una reactancia que va de los -100 Ω a los -400 Ω , y una resistencia baja que varia dependiendo el fabricante[2,3]. Debido a las características del circuito integrado, la impedancia de la antena debe ser inductiva [4], por lo que existen diferentes técnicas en el diseño que permiten obtener las impedancias necesarias para el acoplamiento. De estas técnicas se mostrarán las más utilizadas en la tecnología RFID.

De acuerdo a las últimas investigaciones del diseño de antenas de RFID, las características más importantes que se buscan son las siguientes: la antena debe ser pequeña para ser adherida a diferentes objetos (independientemente de su tamaño o forma), tener un patrón de radiación omnidireccional, proveer la mayor cantidad de energía al CI, ser robusta y barata. En este proceso se han encontrado retos a superar, como la influencia que tienen los materiales a los cuales se adhiere la etiqueta, donde la señal electromagnética en la banda de UHF se ve afectada en gran medida en presencia de líquidos y metales [5], así como la permitividad de cada objeto que afecta el comportamiento de la antena. Otro punto importante es el ancho de banda, el cual, en la tecnología RFID en la banda de UHF va de los 860 MHz a los 960 MHz según las normas EPC [6], aunque cada país tiene su regulación, en el caso de México se utiliza la NOM-121, que limita la operación de 902 a 928 MHz.

El proceso del diseño de antenas parte de tomar un diseño ya conocido y manipular sus dimensiones físicas (tipo de material o tamaño) y a partir de estas modificaciones optimizar algún parámetro en particular (ganancia, ancho de banda, patrón de radiación, etc.). Este proceso muchas veces intuitivo, empírico y en ocasiones se considera que se debe tener un poco de suerte, es funcional, pero puede generar antenas con bajo desempeño [7]. Por ello, existen métodos de optimización (Algoritmos Genéticos, Mínimos Cuadrados, Redes Neuronales) que permiten la búsqueda del diseño mas adecuado para cada aplicación.

2.2 Técnicas de Miniaturización.

Existen diversos tipos de antenas, que se utilizan para etiquetas pasivas de RFID, el tipo de antena esta relacionado con su aplicación, debido a que no existe una antena perfecta que cubra todas las aplicaciones[8]. Existen distintas propuestas, que pueden ocupar el mismo circuito integrado, pero no así el mismo tipo de diseño. Por ejemplo las antenas de parche son apropiadas para operar en objetos metálicos, ya que pueden ocupar el objeto como su plano de tierra [9], por otro lado las antenas F invertida y dipolos modificados (Serpenteadas, dipolos doblados) pueden operar en otros tipos de materiales como pueden ser, madera, cartón, plásticos, etc. [10].

2.1.1. Antenas Lineales Serpenteadas.

Una Antena Lineal Serpenteada o MLA por sus siglas en inglés, es una alternativa atractiva para la reducción de tamaño y costo para etiquetas de RFID [11,12]. Este tipo de antenas por medio de sus dobleces, genera reactancias tanto capacitivas como inductivas, que hacen variar la impedancia de entrada de la antena, lo que permite que resuenen a frecuencias más bajas que un dipolo básico con dimensiones similares

(tanto en largo como en ancho), esto permite en muchos casos el acoplamiento con los CI de RFID[11] a las frecuencias deseadas.

Tomando como referencia la figura 2-1, los parámetros de una MLA son

- N número de vueltas.
- Longitud de los segmentos verticales (h) y horizontales (w).

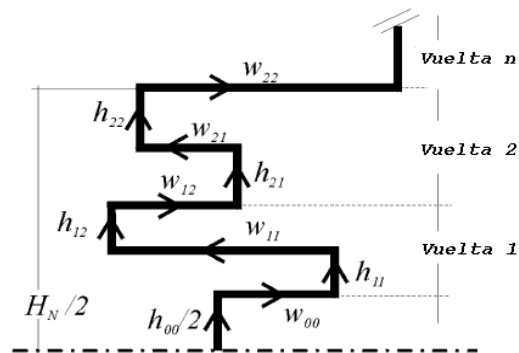


Figura. 2-1 Parámetros Físicos de una MLA.

Los parámetros observados en la figura 2-1, pueden ser simétricos o asimétricos.

Un método básico para la construcción de MLAs [13] es delimitar el espacio en el que se harán las posibles estructuras, tomando en cuenta que debe ser la mitad del tamaño de la longitud de la MLA. El primer paso es hacer matriz de puntos en el área delimitada como se aprecia en la figura 2-2, cada punto con una separación dada. El punto donde se debe colocar la carga solo puede ser uno de los laterales, debido a que se generará al final 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, hecho esto se aplican unas reglas sencillas para la construcción [13]:

- Las líneas serpenteadas iniciaran desde un punto dado de la matriz a otro, y dibujar lo mismo del otro lado de la matriz para mantener la simetría.
- La línea serpenteada sólo puede pasar una vez por cada punto.

- Sólo se consideran como puntos de partida los que estén en el centro de la matriz ya que se supone a que la carga solo puede conectarse en dicha ubicación.

Cada posible estructura que se pueda obtener con la unión de estos puntos permitirá elegir cual se adecua a la impedancia del CI. Este método básico puede ser mejorado aplicando algoritmos de optimización, debido a que se aumenta el número de posibles estructuras.

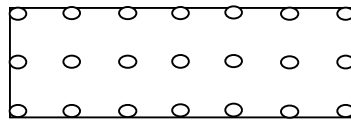


Figura. 2-2 . Matriz de Puntos para el diseño de MLA.

La propuesta de este tipo de diseño para la tecnología RFID se realizó en el 2002 [14], desde entonces se han presentado diferentes tipos de estructuras, algunas de las cuales se muestran en la figura 2-3.

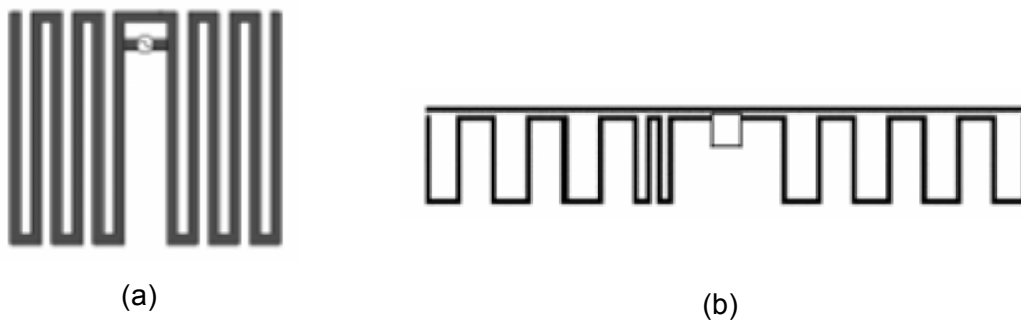


Figura. 2-3 Ejemplos de MLA. Antena (a) propuesta en [15] y (b) propuesta en [4].

La antena de la figura 2-3 (a), es una propuesta realizada por Naobumi Michishita y Yoshihide Yamada [15], que por medio del serpenteo y un sustrato con

una $\epsilon_r = 10$, permiten obtener una antena con dimensiones de 1.26 x 1.57 cm, que opere en los 953 MHz, lo que representa aproximadamente el 5% de la longitud de onda en la frecuencia de operación. Por otro lado la antena de la figura 2-3 (b), es una propuesta pensada para procesos mas comerciales [4] (cajas de cartón), en esta antena observamos que se aplica el serpenteo asimétrico, en otras palabras, la parte derecha y la izquierda de la antena no son iguales, esto hace variar la impedancia de entrada de la antena, que al no ser simétricos los elementos de un extremo no se anulan con el otro. Las dimensiones de esta antena son de 1.57 x 7.57 cm.

La ganancia reportada para la primer antena es de -2.8 dB y de la segunda de 1.5 dB, esto puede deberse a las dimensiones de la antena, que entre mas se reduce puede verse afectado la ganancia.

2.1.2 F Invertida.

Otro tipo de antena utilizada en la tecnología de RFID es la tipo F invertida, una antena F invertida (IFA por sus siglas en ingles) consiste generalmente de un elemento plano, rectangular, localizado sobre un plano de tierra, un pin en corto circuito y un mecanismo de alimentación para el elemento plano (figura 2-3)[16].

El diseño de las IFA como se muestra en la figura 2-4, es una variante de un monopolo [17], donde la parte superior es un dobles. Esta configuración genera capacitancias parasitas, aunque se le agrega un elemento abierto para compensar, esto no solo permite tener un diseño de antena que consigue el acoplamiento con los circuitos integrados de RFID, si no que también reduce el tamaño que se requeriría en un monopolo normal.

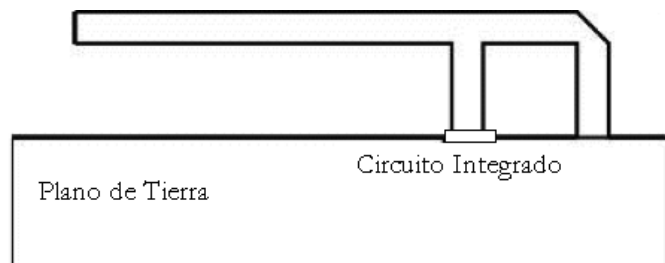


Figura. 2-4 Configuración Básica de una IFA.

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 mas grande (Figura 2-5) y así incrementar el ancho de banda de la antenna [16].

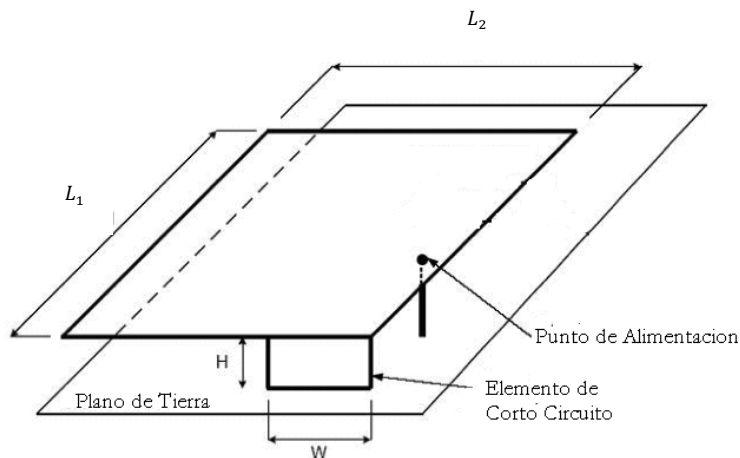


Figura. 2-5 Esquema General de una PIFA.

En la figura 2-5, cada variación en los elementos L_1 , L_2 , H y W , nos permiten obtener una antena con la impedancia requerida para un circuito integrado.

La frecuencia de operación se puede aproximar por medio de:

$$L_1 + L_2 = \frac{\lambda}{4} \quad (2.1)$$

Cuando $\frac{W}{L_1} = 1$:

$$L_1 + H = \frac{\lambda}{4} \quad (2.2)$$

y Cuando $W = 0$:

$$L_1 + L_2 + H = \frac{\lambda}{4} \quad (2.3)$$

Estas ecuaciones nos permiten determinar una PIFA, pero con la limitante de solo reducir la antena a un cuarto de la longitud de onda, por lo que se han propuesto distintos diseños, que permiten la reducción por debajo de $\lambda/4$ [17].

Algunos ejemplos son:

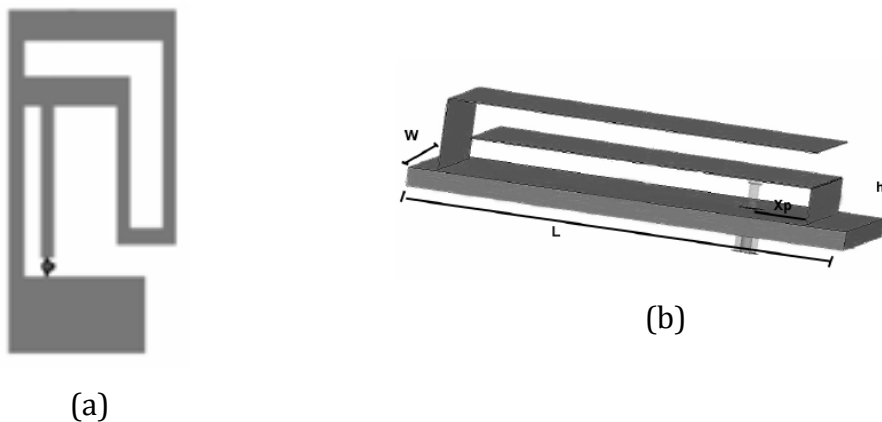


Figura. 2-6 Ejemplos de IFA y PIFA en RFID.

En la figura 2-6 (a) se muestra un ejemplo de una IFA [18], la cual tiene unas dimensiones de 2.95 x 5.9 cm lo que representa un 18 % de la longitud de onda, para esta antena se reporta una ganancia de 1dB. La PIFA de la figura 2-6 (b), es una

modificación del esquema general, al cual se le agrega otro doblez, con el cual se obtienen unas dimensiones de $4 \times 3.9 \times 0.4$ cm y se reporta una ganancia de 1.2 dB [19].

Este tipo de propuestas nos permite observar como se pueden agregar elementos parásitos, que reduzcan el tamaño total de la antena a la vez que se consigue el acoplamiento con el circuito integrado.

2.1.3 Antenas de Ranura.

Las antenas de ranura son otra propuesta para etiquetas de RFID, usadas en algunos casos para identificación de seres humanos [20, 21]. Debido a la reactancia inductiva de la ranura, este diseño tiene una gran capacidad para acoplarse a los CI aún en presencia de objetos con una gran permitividad [22]. El diseño básico se muestra en la figura 2-7.

El contorno de la ranura puede ser visto como un transformador de impedancia, donde cada discontinuidad, provee de un almacenamiento de energía. Por medio del incremento de las ranuras, se incrementan los grados de libertad, con la posibilidad de miniaturizar la antena y agregar características multi-banda (operar en diferentes bandas de frecuencia con una sola antena) [21]. Los parámetros de la antena de ranura pueden ser ajustados por medio de sus dimensiones, por ejemplo en la figura 2-7 los lados “L” determinan en gran parte la ganancia máxima de la antena, mientras que “a” y “b” permiten ajustar la impedancia de entrada.

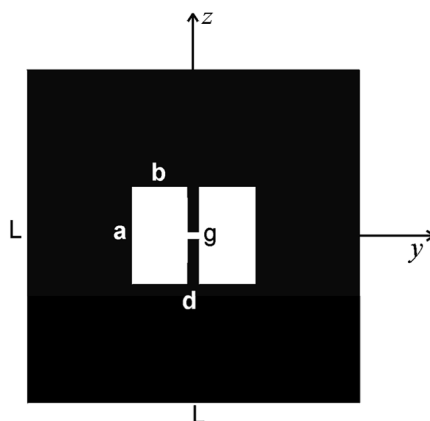


Figura. 2-7 Configuración de una Antena de Ranura

2.1.4 Antenas Tipo Texto

Aunque pueden considerarse un subgénero de las MLA [22], la utilización de texto en las etiquetas no sigue las reglas de construcción básica de las MLA [13], por lo que existen más elementos que afectan la impedancia de la antena [23]. 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.



Figura. 2-8 Ejemplo de una Antena de Texto

El ejemplo que se muestra en la figura 2-8, vemos que se mantienen las formas de las letras, unidas por las parte inferior. Como este existen diversos ejemplos los cuales se vuelven complejos de analizar y se requiere de prueba y error en su elaboración.

2.1.5 Comparación de los Diseños de Antenas de RFID.

Las propuesta de diseño antes mencionadas, deben cumplir con los siguientes requerimientos [24]:

1. Las antenas deben ser delgadas.
2. Ser flexibles y con formas simples (fáciles de fabricar).
3. La impedancia debe mantenerse estable (sin cambios pronunciados en un intervalo corto de frecuencia).
4. Contar con dos terminales de conexión, debido a que la gran mayoría de CI de RFID tienen dos terminales.

Cada una de estas propuestas tiene sus ventajas y desventajas. Para poder apreciar mejor cada una de éstas, se comparan diferentes diseños.

Algunos ejemplos de diseño que se compararán, además de los ya presentados, son los siguientes:



Figura. 2-9 Ejemplos de Antenas de RFID. En (a) antena serpenteada y (b) antena de ranura.

En la figura 2-9, se muestran otros ejemplos de antenas de RFID, donde (a) representa otro ejemplo de una MLA [25], y (b) un ejemplo de una antena de ranura, donde el color negro representa el cobre y el blanco las ranuras [26]. La comparación de los diseños se hace en la tabla III mostrada a continuación.

Tabla III Comparación de Diseños de Antenas para RFID

Antena	Frecuencia de Operación (MHz)	Ganancia (dB)	Alto (cm)	Largo(cm)	Área Total (cm ²)
Figura 2-3 (a)	953	-2.8	1.57	1.26	1.97
Figura 2-3 (b)	915	1.5	1.57	7.87	12.35
Figura 2-6 (a)	870	1	2.5	5.9	14.75
Figura 2-6 (b)	915	1.2	4	3.9	15.6
Figura 2-8	806	0.85	1.5	10.5	15.75
Figura 2-9 (a)	915	1	1.57	7.4	11.61
Figura 2-9 (b)	912	1.7	5	7	35

En la tabla III, se comparan los parámetros de las antenas. Como podemos observar cada una ésta diseñada para resonar a una frecuencia diferente, pero todas a excepción de la antena tipo texto de la figura 2-8, operan dentro del ancho de banda de la tecnología RFID que va de los 860 a los 960 MHz [6]. En cuanto a la ganancia, se puede apreciar una relación, entre el tamaño de la antena y la ganancia de la misma (tomando en cuenta que la ganancia de la antena es directamente proporcional al tamaño de la antena respecto a la longitud de onda [27]), por lo que la que mayor ganancia presenta es la antena de la figura 2-9 (b) y la de menor ganancia es la antena de la figura 2-3 (a), aunque existen excepciones, en donde, con un área menor, se tiene una mejor ganancia. Esto puede deberse a un mal acoplamiento o a otros factores que se presentan en la miniaturización de la antena, como por ejemplo en la reducción de la eficiencia, ya que ésta es un parámetro directo del tamaño de la antena.

De la tabla III podemos tomar en consideración, como las MLA, con una menor área presentan una mejor ganancia que las IFA.

En este trabajo de tesis, nos centraremos en las MLA, en parte por que se puede apreciar que tienen una mejor ganancia y por otro lado, no requieren de una gran cantidad de cobre (lo que incrementa los gastos de fabricación) como es el caso de las antenas de ranura.

2.2 Técnicas para el Acoplamiento de Impedancias.

El acoplamiento de impedancias relaciona la energía electromagnética transferida de un medio a otro, en el caso de las etiquetas de RFID, se da de la antena al circuito integrado. La absorción de la energía depende de las impedancias relativas de los dos medios [28]. Para una máxima transferencia de energía entre la antena y la carga, la impedancia debe estar acoplada, es decir que la parte real de las impedancias deben ser equivalentes, y las partes reactivas deben ser equivalente en magnitud, pero opuestas en signo. Esto se aprecia en el circuito de la figura 1-6 y en la ecuación (1.2), así como en el análisis realizado en el Tema 1.2.4.3.

Los tipos de diseño de antenas, antes descritos, permiten por medio de variaciones en sus estructuras físicas, el acoplamiento con los circuitos integrados. En algunos de ellos se utilizan las técnicas de acoplamiento que se explicarán a continuación, los cuales permiten obtener un acoplamiento de impedancias de una forma mas controlada [28].

2.1.1 Acoplamiento T

El acoplamiento T, o mejor conocido como T-Match, 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 por una distancia [28], como se muestra en la figura 2-10 y del cual se obtiene su circuito equivalente para el cálculo de la impedancia (Figura 2.11) [28].

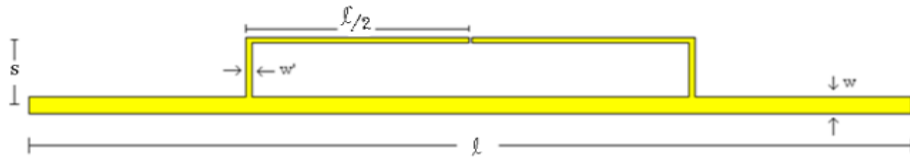


Figura. 2-10 Acoplamiento T.

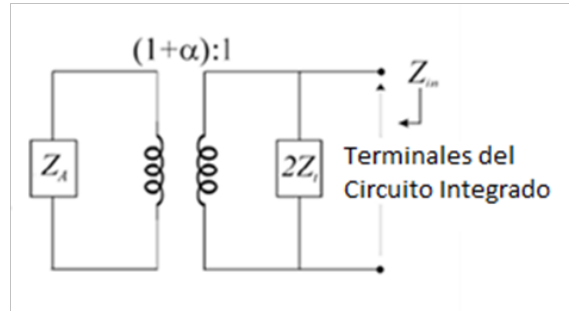


Figura. 2-11 Circuito Equivalente del Acoplamiento T.

Para el análisis de esta configuración, consideramos que es un sistema balanceado que puede ser dividido en dos modos distintos: el modo de línea de transmisión y el modo de antena[28]. Este tipo de análisis permite calcular la impedancia de entrada. La ecuación que lo representa es la siguiente:

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} = \frac{2Z_t(1 + \alpha)^2 Z_a}{2Z_t + (1 + \alpha)^2 Z_a} \quad (2.4)$$

Donde:

R_{in}	Resistencia de entrada.
X_{in}	Reactancia de entrada.
$Z_t = jZ_0 \tan\left(k \frac{l'}{2}\right)$	Impedancia de entrada en modo de línea de transmisión
$k = \frac{2\pi}{\lambda}$	Constante de propagación de onda.
Z_0	Impedancia Característica.
l'	longitud del segundo dipolo.

$Z_a = R_a + jX_a$	Impedancia de la Antena
R_a	Resistencia de la Antena
X_a	Reactancia de la Antena
$\alpha = \frac{w}{w'}$	Factor de División de Corriente
w	Ancho del primer Dipolo
w'	Ancho del segundo dipolo

En (2.4), consideramos la impedancia en los dos modos y un factor de división de corriente.

La impedancia de la antena, tanto real como imaginaria, se obtiene de las ecuaciones:

$$R_a = \frac{\eta}{2\pi} \left(C + \ln(kl) - C_i(kl) + \frac{1}{2} \sin(kl) * [S_i(2kl) - 2S_i(kl)] + \frac{1}{2} \cos(kl) * \left[C + \ln\left(\frac{kl}{2}\right) + C_i(2kl) - 2C_i(kl) \right] \right) \quad (2.5)$$

$$X_a = \frac{\eta}{4\pi} \left(2S_i(kl) + \cos(kl) [2S_i(kl) - S_i(2kl)] - \sin(kl) \left[2C_i(kl) - C_i(2kl) - C_i\left(\frac{2kr^2}{l}\right) \right] \right) \quad (2.6)$$

Donde C representa la constante de Euler, r representa el ancho del conductor, S_i y C_i son integrales de seno y coseno de propósito específico [28].

En (2.5) y (2.6) vemos que la impedancia de la antena depende, del largo y de la constante de propagación de onda, la cual está asociada a 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 [30] donde tenemos:

$$Z_0 = \frac{148}{\ln\left(2 \frac{s+w'}{w+s+w'} \frac{w+s}{s}\right)^{\frac{1}{4}}} \quad (2.7)$$

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

Por medio de (2.4), podemos calcular la impedancia, al realizar variaciones en la antena (como el largo de los dipolos o la separación). Para analizar el comportamiento, se propone una antena con acoplamiento T, calculada para media longitud de onda, a una frecuencia de 915 MHz, quedando $l \approx 16.4$ cm. La respuesta se muestra en la figura 2-12 (a) para la parte resistiva y 2-12 (b) para la reactiva. En las gráficas, el eje “x”, representa la variación de la longitud del segundo dipolo (l'), el eje “y” la separación entre los dos dipolos (s) y el eje “z” la resistencia y reactancia en ohms.

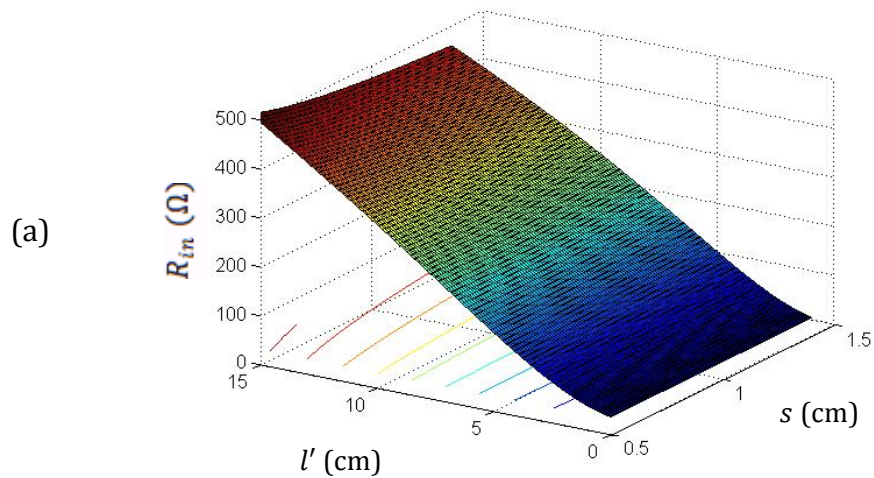


Figura. 2-12. Variación de la impedancia de la antena en relación a sus dimensiones. (a) Resistencia, (b) Reactancia.

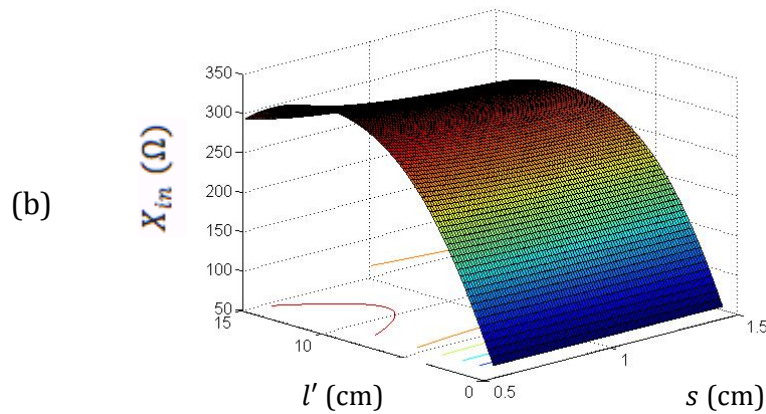


Figura 2-12. (Continuación).

De la figura 2-12, podemos deducir el comportamiento de la impedancia de la antena, cuando variamos, el tamaño del segundo dipolo y la separación entre los dos elementos. En donde la resistencia se incrementa conforme crece la longitud de l' pero no se ve afectado por la separación. En cambio, la reactancia cambia conforme crece l' pero en este caso la separación si tiene un tipo de influencia, la cual genera que incremente en algunos puntos.

2.1.2 Acoplamiento Inductivo.

El acoplamiento inductivo, es una técnica empleada para el acoplamiento de antenas pequeñas [31], que por medio de un loop y un elemento reflector, permiten adaptarse a diferentes impedancias. El esquema básico se muestra en la figura 2-13, y su circuito equivalente en la figura 2-14

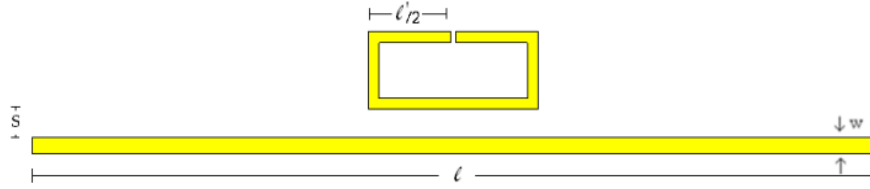


Figura. 2-13 Acoplamiento Inductivo

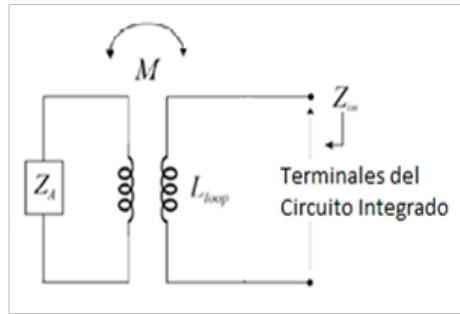


Figura. 2-14 Circuito Equivalente del Acoplamiento Inductivo

En la figura 2-13, observamos la configuración básica, que consta del loop que puede ser cuadrado o rectangular, el cual esta separado de un elemento reflector con una longitud l , a una distancia s . Como se puede apreciar en la figura 2-14, este acoplamiento se puede analizar como si fuera un transformador [31]. Para calcular la impedancia de entrada utilizamos

$$Z_{in} = R_{in} + X_{in} = Z_{loop} + \frac{(2\pi f M)^2}{Z_A} \quad (2.8)$$

R_{in}	Resistencia de entrada.
X_{in}	Reactancia de entrada.
Z_{loop}	Impedancia del Loop.
f	Frecuencia.
M	Inductancia Mutua.
Z_a	Impedancia de la Antena

En donde la impedancia del loop (Z_{loop}), se calcula por medio de (2.9):

$$Z_{loop} = j2\pi f L_{loop} \quad (2.9)$$

En donde L_{loop} , es la inductancia del loop, para calcularlo las ecuaciones dependen de si a y b son iguales (un loop cuadrado) o diferentes (loop rectangular)[32], en la figura 2.15, se muestran los parámetros que se requieren para el calculo.

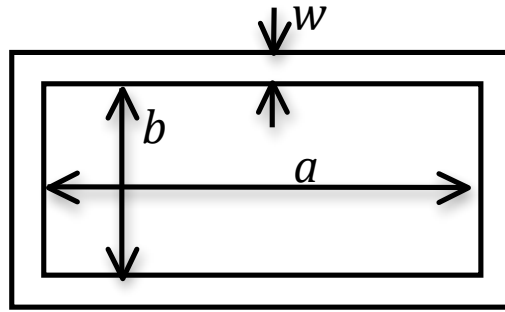


Figura. 2-15 Parámetros del Loop.

Para el loop rectangular tenemos:

$$L_{loop} = 4 \times 10^{-7} \left\{ a \ln \left(\frac{2a}{w} \right) + b \left(\frac{2b}{w} \right) + 2\sqrt{a^2 + b^2} - a \ln \left[\frac{a}{b} + \sqrt{\left(\frac{a}{b} \right)^2 + 1} \right] - b \ln \left[\frac{b}{a} + \sqrt{\left(\frac{b}{a} \right)^2 + 1} \right] - 2(a + b) \right\} \quad (2.10)$$

En caso de un loop cuadrado se tiene: [32]

$$L_{loop} = 8 \times 10^{-7} a \left[\ln \left(\frac{2a}{w} \right) + \sqrt{2} - \ln (1 + \sqrt{2} - 2) \right] 8 \times 10^{-7} a \left[\ln \left(\frac{a}{w} \right) - 0.774 \right] \quad (2.11)$$

Donde :

w Ancho del conductor de loop.

Para obtener la inductancia mutua en este tipo de estructuras se utiliza (2.12) [33], la cual relaciona, las dimensiones del loop y la separación con el reflector.

$$M = 2 \times 10^{-7} \frac{ab}{s} \quad (2.12)$$

Para obtener Z_A se utilizan (2.5) y (2.6) como en el caso del acoplamiento T.

En los casos donde el reflector esta en resonancia, la reactancia total de entrada depende solamente de la inductancia del loop, mientras que la resistencia está relacionada con la inductancia mutua (M) entre el loop y el reflector [30].

$$R_{in}(f_0) = \frac{(2\pi f_0 M)^2}{R_A(f_0)} \quad (2.13)$$

$$X_{in}(f_0) = j2\pi f_0 L_{loop} \quad (2.14)$$

En donde f_0 es la frecuencia de resonancia del reflector.

De la misma forma que con el acoplamiento T, podemos analizar el comportamiento del acoplamiento inductivo, utilizando (2.8) para una antena que opere en 915 MHz, donde $l \approx 16.4$ cm, y con un loop cuadrado por lo que se utiliza (2.11). Se realizan variaciones, tanto en a , b y s , a fin de observar el comportamiento de la impedancia, tanto en su parte resistiva como reactiva, dando como resultado, las gráficas mostradas en la figura 2-16 (a) para la parte resistiva y 2-16 (b) para la reactiva.

Por las gráficas de la figura 2-16, podemos entender el papel que juegan los elementos del acoplamiento, donde la parte resistiva depende en gran parte de la separación del loop y el reflector, donde la resistencia se incrementa en relación directa la separación entre estos elementos, en el caso de la reactancia, se incrementa entre mas grande se hace la longitud del loop, aunque con una variación dependiendo de la separación de los dos elementos. En estas gráficas el eje “x” representa la longitud del loop, el eje “y” la separación entre los elementos y “z” la impedancia, en (a) la parte resistiva y en (b) la reactiva. $X_{in} (\Omega)$

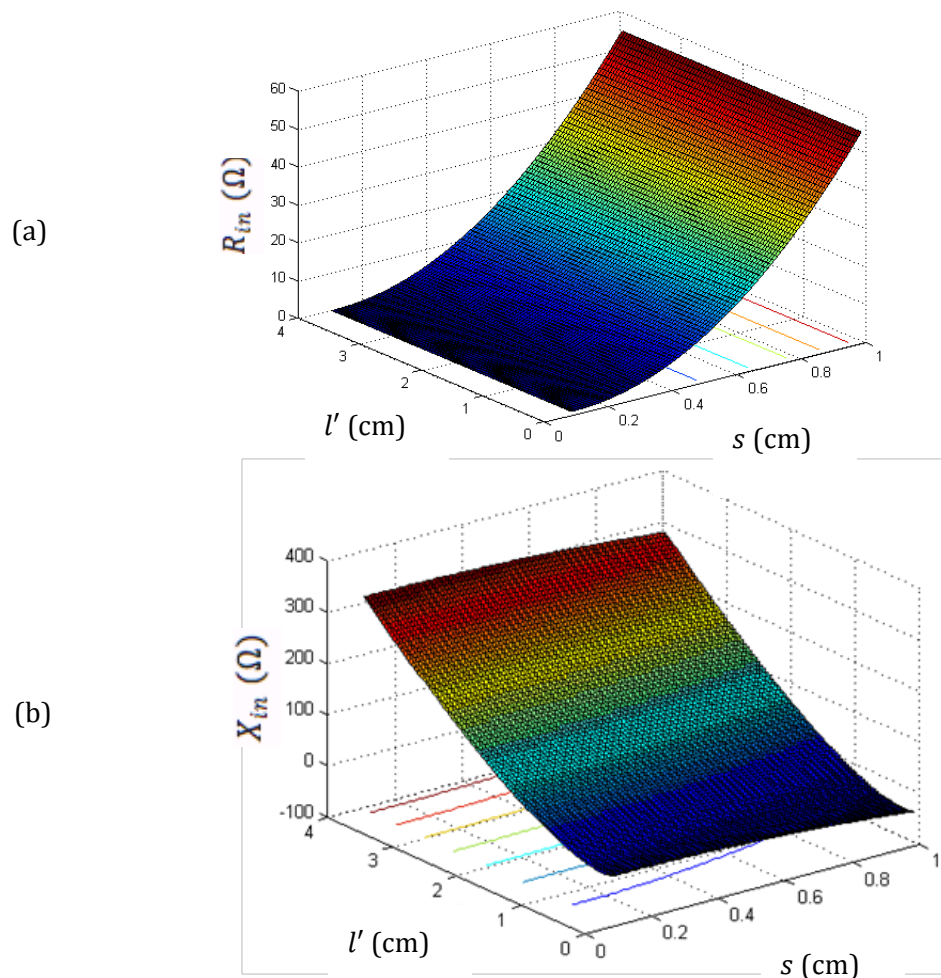


Figura. 2-16 Variación de la impedancia de la antena en relación a sus dimensiones (a) Resistiva, (b) Reactiva.

2.1.3 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, de forma controlada, por ejemplo, en la evolución de las antenas de RFID (Figura 2-17) [33], podemos apreciar que se partió de un modelo básico de Acoplamiento T, al que se le fueron agregando elementos parásitos y posteriormente se les fue otorgando elementos de serpenteo, para alcanzar una técnica de acoplamiento inductivo combinado con el serpenteo.

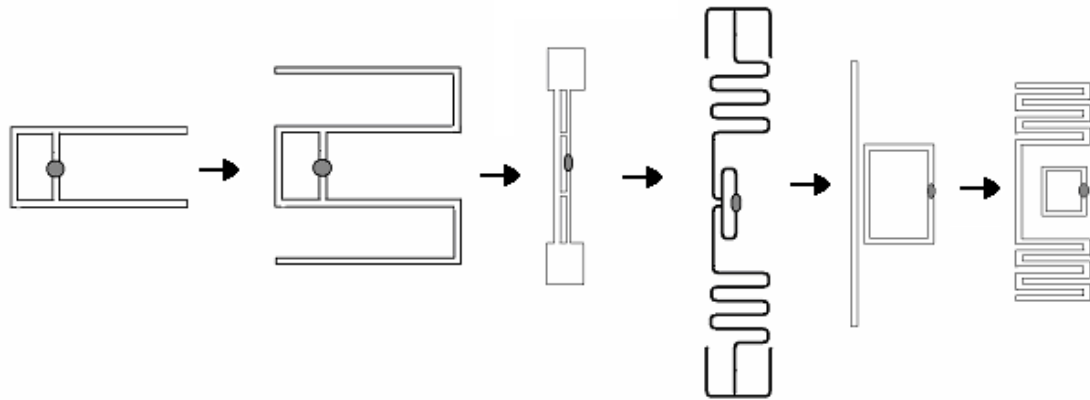


Figura. 2-17 Evolución de las Antenas de RFID.

Esta evolución nos muestra como se ha ido desarrollando la búsqueda de métodos de acoplamiento más efectivos, que permitan un mejor desempeño en el sistema de RFID, sin tener que recurrir a cambios importantes en los CI.

2.3 Proceso de Diseño de las Antenas de RFID.

El proceso de diseño de antenas para la tecnología de RFID sigue una serie de pasos importantes, con el fin de que obtengamos elementos con un buen desempeño. Un ejemplo de una metodología general es la propuesta de Pavel V. Nikitin que

plantea una serie de pasos para el diseño de antenas de RFID[4], en la cual consideramos en primer lugar el tipo de aplicación, y dependiendo de esta, se plantean los requerimientos mínimos para luego pasar a la parte del diseño, optimización y caracterización. Basándose en esta metodología general, se propone un proceso de diseño para este trabajo de tesis, el cual se muestra en la figura 2-18.

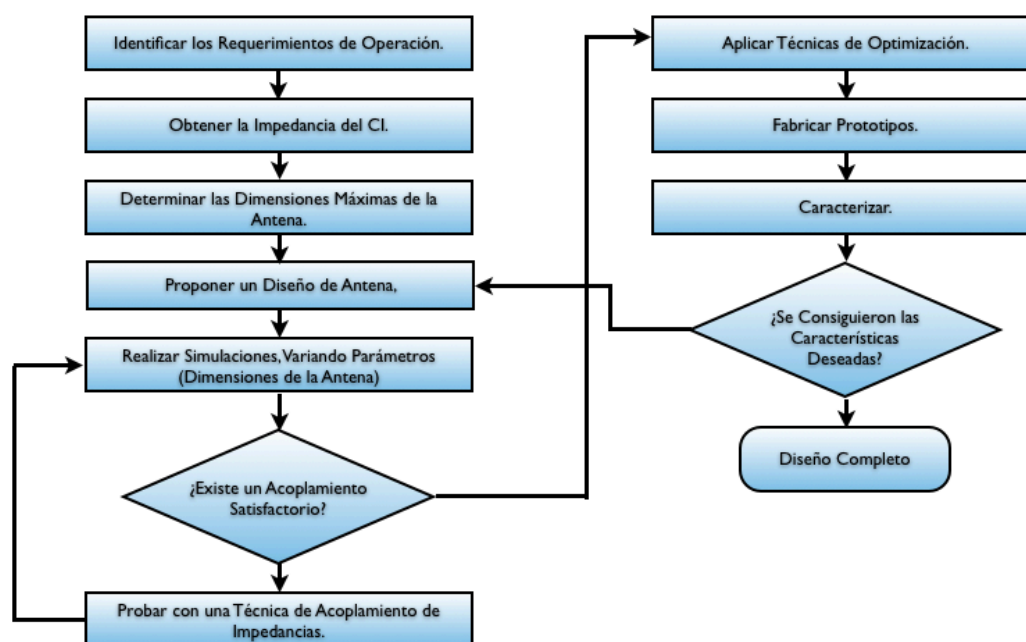


Figura. 2-18 Diagrama del Proceso de Diseño para Antenas de RFID.

Cada segmento del proceso de diseño de la figura 2-18 se explicará a continuación.

2.3.1 Requerimientos de Operación.

El primer bloque del proceso de diseño nos permite determinar los parámetros que deseamos de la antena para la etiqueta de RFID, como pueden ser:

-
1. Frecuencia de Operación: Puede cubrir todo el espectro de UHF de 850 a 950 MHz, o reducirlo para operar conforme a las normas de alguna región en específico.
 2. Campo de Operación: Dependerá de las necesidades, para algunas aplicaciones, se pueden considerar de uno a tres metros, pero para otras, se puede buscar que alcancen los 15 m.
 3. Nivel de Acoplamiento: Este requerimiento, se da en función de cuan eficiente queremos que sea nuestro sistema. Se determina por medio del coeficiente de transferencia de energía representado en (1.2).
 4. Costos: Uno de los objetivos de las antenas RFID antes mencionados es el de un costo reducido [24], este requerimiento limita algunas opciones, por ejemplo el tipo de material a utilizar y el tipo de diseño, ya que entre mas raro el material o la cantidad que se utilice o entre mas complejo sea su proceso de fabricación, el costo aumenta [6].

El definir estos objetivos al principio del diseño, nos permite tener una idea clara del tipo de requerimientos que propondremos, y la complejidad del mismo.

2.3.2 Impedancia del Circuito Integrado

Conocer la impedancia del circuito integrado, así como su sensibilidad (potencia mínima a la que puede operar) es fundamental para obtener el mejor desempeño posible de la etiqueta de RFID [34]. En especial la impedancia del CI, ya que la antena se debe diseñar para acoplarse a ésta.

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 se muestra una o dos frecuencias. Existen unos pocos esfuerzos por obtener un método de medición de la impedancia y sensibilidad del CI, uno de ellos es el propuesto por

Pavel V. Nikitin y K. V. Seshagiri Rao en [34]. El cual por medio de conectores SMA, dispuestos en corto, abierto y con una carga de $50\ \Omega$ (Figura 2-19), calibran un analizador de redes vectoriales, con el cual se puede caracterizar los CI.



Figura. 2-19 Método de Calibración Utilizando Conectores SMA de $50\ \Omega$

Como el objetivo de este trabajo se centra en el diseño de las antenas, no se hará mucho hincapié en la medición de los CI. Las impedancias se tomarán de la tabla II, la cual maneja los principales CI de RFID en el mercado, y su impedancia a una frecuencia de 915 MHz.

2.3.3 Propuesta del Diseño de la Antena.

El siguiente paso en el proceso de diseño, se da entre determinar las dimensiones máximas de la antena y la propuesta de diseño de antena, la cual se buscará, se acople al CI.

Se tiene que considerar que las dimensiones máximas de la antena, repercuten en la ganancia y ancho de banda máximos que se pueden obtener [35], por lo que se tiene el compromiso, mantener las dimensiones máximas 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 CI. La selección del tipo de diseño se tomará a partir de las necesidades de la aplicación.

2.3.4 Proceso de Simulación.

El análisis de antenas de RFID (al igual que en otros tipos de antenas), se hace por medio de modelos electromagnéticos y herramientas de simulación electromagnética [4].

Debido a la complejidad del análisis de estas estructuras, en los últimos años, se ha hecho uso de herramientas computacionales precisas, basadas en métodos numéricos. En esta familia de métodos numéricos se incluyen: el Método de Momentos (MoM), el método del elemento finito (FEM), técnica de integración finita (FIT) y el método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD), a partir de los cuales se han generado múltiples herramientas de simulación, cada una utilizada para diferentes tipos de problemas de diseño. Por ejemplo el MoM se utiliza para hacer un cálculo rápido y preciso del desempeño de antenas, en especial de estructuras de gran tamaño. En lo que respecta a los métodos de FEM y FDTD pueden ser utilizados directamente para analizar el desempeño de las antenas.

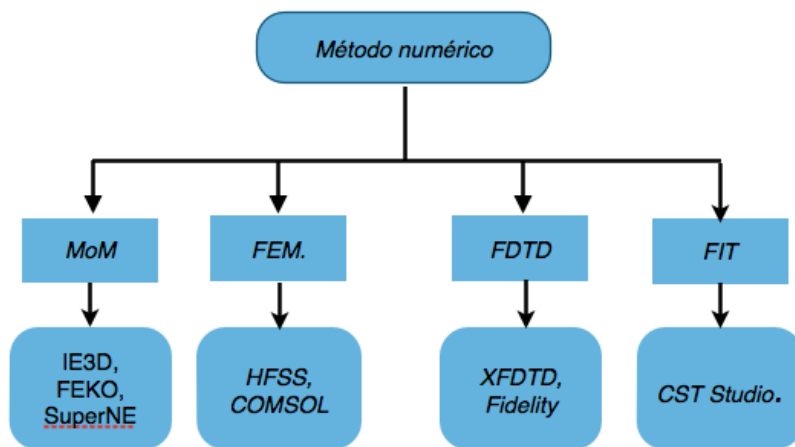


Figura. 2-20 Métodos Numéricos y Programas de Simulación.

En la figura 2-20, se muestran algunos ejemplos de simuladores electromagnéticos, agrupados por el método numérico que emplean. Para este trabajo

de tesis se utilizará el HFSS y el CST studio, un simulador basado en el FEM y el otro en FIT, que han sido utilizados para varios diseños de antenas de RFID.

2.3.4.1 Simulador Electromagnético HFSS

El simulador HFSS propiedad de la compañía ANSYS, es una herramienta de simulación, que permite la creación de modelos en tercera dimensión, el cual ocupa el método del elemento finito (FEM) para resolver las ecuaciones de Maxwell [36], La principal ventaja de utilizar FEM para resolver ecuaciones diferenciales parciales, recae en la habilidad de construir bloques básicos (tetraedros figura 2-21), usados para discretizar los modelos y convertirlos a geométricas arbitrarias.



Figura. 2-21 Tetraedro

La construcción de estos bloques, permite al HFSS generar mallas que se adapten a las estructuras y permita obtener resultados precisos. Un ejemplo de esto, se aprecia en la figura 2-22, en donde se muestra una antena de parche, en la cual al inicio los tetraedros no se adaptan al contorno de la antena, pero al terminar el proceso de adaptación, se observa como se ajustan a ella.

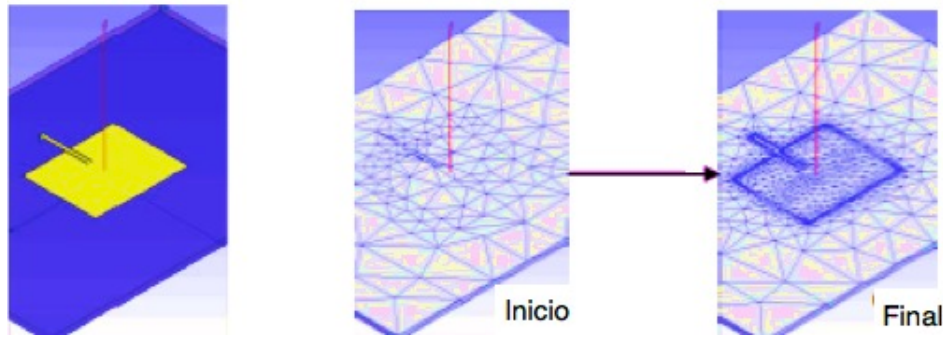


Figura. 2-22 Ajuste de Mallas en el HFSS.

Cabe señalar que utilizar el FEM para resolver problemas electromagnéticos, es una norma desde 1990, lo que da un respaldo a la resolución de estos problemas [36].

2.3.4.2 Simulador Electromagnético CST Studio

En cuanto al simulador CST Microwave Studio, es otra herramienta de simulación de estructuras en tercera dimensión, el cual se basa en la técnica de integración finita, desarrollada en 1971 por Weiland, donde propone una reformulación de las ecuaciones de Maxwell en su forma integral. Este método provee de una herramienta aplicable a distintos problemas electromagnéticos, que van de cálculos de campos estáticos a aplicaciones de alta frecuencia en el dominio del tiempo [37]. Como otros métodos numéricos, FIT discretiza las ecuaciones de Maxwell y al igual que el HFSS genera mallas para analizar el sistema, aunque no de forma automática.

Entre las ventajas del simulador CST Microwave Studio, es que dispone de un sistema de aceleración de Hardware, que permite que se hagan simulaciones en un tiempo más corto.

2.3.5 Proceso de Optimización.

Una vez, que se consigue una antena que se acople al CI, ya sea por el diseño propio de la antena o por aplicar una técnica de acoplamiento (T o inductivo), lo cual se puede lograr por medio de la experiencia y la intuición [24], se procede a optimizar la antena. Este proceso se realiza para mejorar aquellos puntos en los que el proceso de prueba y error llevaría una 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 envuelve una gran cantidad de parámetros. Estos parámetros incluyen las diferentes dimensiones que conforman una antena, en el caso de las MLA, el número de serpenteos, el ancho y alto de cada sección, y en caso de requerir de una técnica de acoplamiento se debe incluir el tamaño del loop, o del acoplamiento T. La meta de los métodos de optimización es el de encontrar una solución que nos permita obtener los mejores parámetros (ancho de banda, ganancia, etc) [38].

Para el proceso de diseño propuesto, nos enfocaremos en el método de optimización por algoritmos genéticos (GA).

La aplicación de GA en la tecnología RFID, aparece por primera vez en el trabajo de Gaetano Marroco, Alessandro Fonte y Fernando Bardati [39], en el cual aplican el algoritmo genético a MLAs, que analizan por medio del método de los momentos (MoM), en busca de mejorar la ganancia de las antenas, dejando a un lado el acoplamiento entre el CI y la antena.

A continuación se explica cual es base sobre la que operan los algoritmos genéticos.

2.3.5.1 Algoritmos Genéticos

Históricamente la mayoría de las investigaciones para el diseño de sistemas electromagnéticos se basan en el método determinístico [40]. Pero en los últimos años, con los avances en la computación, se ha logrado el proceso de optimización de dispositivos electromagnéticos por medio de algoritmos genéticos (GA) [41]. La idea básica, inspirada en los procesos evolutivos, es que el contenido genético de una población puede tener potencialmente la solución, o una solución mejor, a un problema dado de optimización [42].

La ventaja que tienen los GA, es que mientras la mayoría los otros métodos operan sobre una única solución, estos GA operan en una población de soluciones. Este método considera una serie de posibles soluciones, basado en la variación de parámetros ya sean dimensiones y tipos de materiales. La aplicación más estudiada de los GA en electromagnetismo se centra en el diseño de antenas, donde entre otras cosas se ha utilizado para optimizar el desempeño de antenas ya estudiadas como de tipo Yagi y Reflectoras [43]. En todos los casos se busca una solución optimizada de algún parámetro o parámetros en específico (como pueden ser el ancho de banda, ganancia o el acoplamiento de impedancias que es el caso de este trabajo).

Un algoritmo genético consiste en una función matemática o una rutina de software que toma como entradas a los ejemplares y retorna como salidas cuáles de ellos deben generar descendencia para la nueva generación.

Versiones más complejas de algoritmos genéticos generan un ciclo iterativo que directamente toma a la especie (el total de los ejemplares) y crea una nueva generación que reemplaza a la antigua, una cantidad de veces determinada por su propio diseño. Una de sus características principales es la de ir perfeccionando su propia heurística en el proceso de ejecución, por lo que no requiere largos períodos de entrenamiento especializado, por parte del ser humano, el cual es principal defecto de otros métodos para solucionar problemas, como los Sistemas Expertos.

Otras ventajas de los algoritmos genéticos son las siguientes:

- Opera con un grupo (o población) de soluciones de forma paralela.
- Normalmente opera en función de un grupo de parámetros (Cromosomas)
- Usa operadores estocásticos (Selección, Cruza y Mutación) para explorar las posibles soluciones y obtener la óptima.

Para comprender mejor la operación de los GA, se utilizan los siguientes conceptos para referirse a ciertas operaciones o componentes del sistema:

- Población: Conjunto de soluciones
- Padres: Miembros de la generación en proceso
- Hijos: Miembros de la siguiente generación
- Generaciones: Poblaciones creadas
- Cromosomas: Formado por genes, contiene los patrones que crean al individuo
- Elitismo: Soluciones que logran destacar de la población, y se aproximan al valor deseado.
- Función Objetivo: Es la función matemática, la cual contiene los elementos que se desean optimizar, de la cual se obtiene el valor deseado al que se quiere llegar.

Cada uno de estos elementos forman la mayoría de los GA, de ahí la importancia de entender a que se refieren cada uno de ellos.

2.3.6 Proceso de Caracterización.

Una vez terminado el proceso de simulación, optimización y construcción, se requiere caracterizar la antena de RFID, a fin de comprobar los parámetros finales de la antena. Este paso es importante, ya que se pueden encontrar algunos errores no previstos durante la simulación o en el proceso de optimización.

Uno de los puntos mas importantes de la caracterización, se da en la medición de la impedancia. Tener un método preciso, que mida este parámetro, ha sido un tema recurrente en los últimos años, en muchos casos se debe a que las antenas de RFID no siempre son simétricas, lo que genera errores al querer hacer mediciones directas con los analizadores de redes vectoriales [44].

Actualmente existen muchas propuestas para la medición de este tipo de dispositivos, algunos de ellos son:

1. Usando baluns: El balun es un transformador de impedancias muy utilizado en antenas, para conectar un sistema no balanceado con uno balanceado. En RFID se han propuesto para la medición de impedancia de las antenas [45], pero con la desventaja que la precisión de la medición depende de la calidad del balun.
2. Con plano de Tierra: Esta técnica consiste en medir la mitad de la antena (por lo que solo sirve para antenas simétricas) sobre un plano de tierra, para posteriormente procesar los datos y considerar la otra mitad [26,46]. Es un método preciso pero con el inconveniente de solo permitir la medición de antenas simétricas, un ejemplo de esta configuración se aprecia en la figura 2-23.

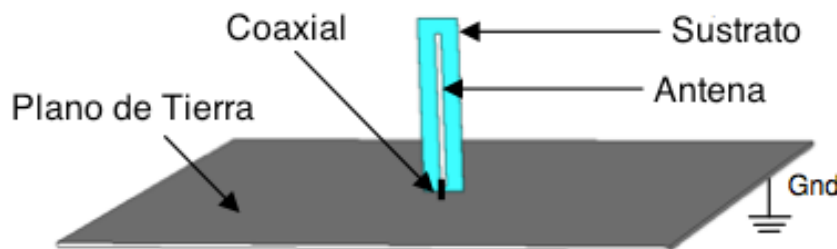


Figura. 2-23 Configuración para la Medición de Impedancia Utilizando Plano de Tierra

3. Método Diferencial: Este método, por medio de la creación de una tierra “virtual”, entre las terminales de la antena, permite el cálculo de la

impedancia utilizando los datos de los parámetros S obtenidos del VNA. Este método tiene la ventaja de permitir la medición de antenas no simétricas, además de que se considera preciso [47].

De estas tres opciones, en el proceso de diseño de este trabajo de tesis, se opta por el método diferencial, el cual se describe a continuación:

La figura 2-24 (a), muestra un dipolo asimétrico balanceado, éste está diseñado con distintas dimensiones y alimentado de forma diferencial. Los puertos (positivo y negativo) de la fuente están conectados a las terminales de la antena. En la figura 2-24 (b) se observa que el voltaje que circula, se divide en V_1 y V_2 con un plano de tierra “virtual”. En la Figura 2-24 (c) se considera cada terminal de la antena junto con la tierra, como un puerto. Finalmente en la figura 2-24 (d) podemos observar la antena con una equivalencia a una red de dos puertos. Una vez teniendo este diagrama equivalente, podemos analizarlo con parámetros S:

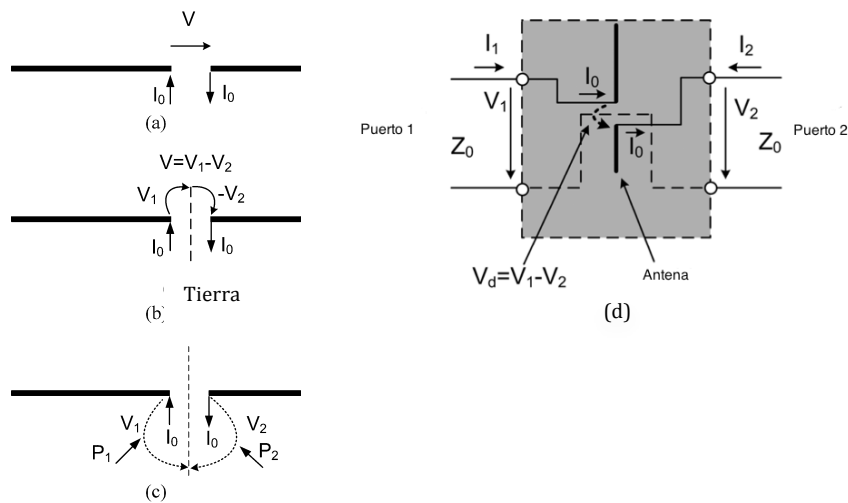


Figura. 2-24 Diagrama del Análisis de un Dipolo Asimétrico[48]. (a) Corrientes Presentes, (b) Voltaje Diferencial, (c) Equivalencia de puertos, (d) Red Equivalente de dos Puertos.

De la figura 2-24 (d), la impedancia normalizada de la antena se puede expresar como:

$$\tilde{Z}_d = \frac{V_d}{I_0} = \frac{V_1 - V_2}{I_0} \quad (2.17)$$

Basados en la definición de los parámetros Z, la relación de la corriente y voltajes se relacionan por:

$$V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 \quad (2.18)$$

$$V_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 \quad (2.19)$$

Considerando $I_1 = I_0$ e $I_2 = -I_0$, el voltaje diferencial esta dado por:

$$V_d = V_1 - V_2 = (Z_{11} - Z_{21} - Z_{12} + Z_{22})I \quad (2.20)$$

y la impedancia es:

$$\tilde{Z}_d = \frac{V_d}{I_0} = \frac{V_1 - V_2}{I_0} = (Z_{11} - Z_{21} - Z_{12} + Z_{22}) \quad (2.21)$$

Convirtiendo los parámetros Z en parámetros S y considerando $Z_d = Z_0 * \tilde{Z}_d$, obtenemos:

$$Z_d = \frac{2Z_0(1 - S_{11}S_{22} + S_{12}S_{21} - S_{12} - S_{21})}{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{21}S_{12}} \quad (2.22)$$

Donde Z_0 es la impedancia característica.

A partir de este método y utilizando los valores entregados por el analizador de redes vectoriales, se podrá calcular la impedancia del dipolo de manera mas precisa.

2.4 Conclusiones.

En este capítulo se mostraron las bases existentes del diseño de antenas de RFID en la banda de UHF, empezando por las técnicas de miniaturización, de las cuales, existen diversas propuestas, cada una adaptada a diferentes aplicaciones, con sus ventajas y desventajas. De ellas se tomó la decisión de trabajar sobre las antenas lineales serpenteadas o MLA, debido a las ventajas que presentan de manera general.

Otro punto importante que fue estudiado, son las técnicas de acoplamiento, que permiten de una manera controlada, el acoplamiento con el circuito integrado, que como se vio en los trabajos referenciados, es el parámetro más importante y por el cual se han generado diferentes propuestas, tanto de tipos de antenas como las propias del acoplamiento, que a lo largo de la evolución de los diseños se han ido adaptando en busca de mejorar el desempeño en cada una de ellas.

La última parte de este capítulo, se centra, en la propuesta de una serie de pasos que conforman un proceso de diseño. Este proceso, se inicia al determinar las características y requerimientos, que deseamos que cumplan las antenas. A lo largo de la explicación de cada punto del proceso de diseño, se fue seleccionando las opciones a utilizar, por ejemplo, el simulador electromagnético, el tipo de optimización, así como el mejor método para la caracterización de la antena. Todo ello con el fin de que en los capítulos siguientes se sigan estos pasos y se obtengan antenas con un buen desempeño.

Referencias.

- [1] Tan-Phu Vuong, Vincent Beroulle Smail Tedjini, "Antennas for RFID Tags," *ensOc-EUSAI conference*, Grenoble, 2005
- [2] J.Curty, Joehl, C. Dehollain y M. J Delercq, "Remotely Powered Addressable UHF RFID integrated system", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, pp 2193-2202, Noviembre 2005.
- [3] S. Basat, S. Bhattacharya, A. Rida, S. Johnston, L. Yang, M.M. Tentzeris y J. Laskar, "Fabrication and Assembly of a Novel High Efficiency UHF RFID Tag on Flexible LCP Substrate", *Electronic components ans Technology Conference*, pp1352-1355, Mayo-Junio 2006
- [4] Pavel V. Nikitin, Sander F. Lam K. V. Seshagiri Rao, "Antenna Design for UHF RFID Tags: A Review and a Practical Application", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 12, 2005
- [5] Foster P. yBurberry. R, "Antennaproblems in RFID system," IEE Colloquiumon RFID Technology, pp. 3/1-3/5, Enero 1999.
- [6]EPCGlobal Inc."EPCglobalTag Data Standards" Princeton Pike Corporate Center Version 1.3, 18 de Marzo 2006.
- [7] Stace A, "Use of GeneticAlgorithms in Electromagnetics", BacherlorsThesis, University of Queensland 1997.
- [8] B.R.A F.P.R, "Antenna Problems in RFID Systems," *IEE Colloquium*, pp. pp 1-5, 1999
- [9] Curty J. P., Declecdq M., Dehollain C. y Joehl N. "Design and Optimization of Passive UHF RFID System", *Springer ISBN*, New Jersey 2007.
- [10] Ukkonen L, Sydanheimo L. Y Kivikoski M., "A Novel Tag Design Using Inverted-F RFID Tag Antenna Mountable On Metallic Objects", *Proceddings of IEEE/Sarnoff Symp. On Advances in Wired and Wireless Communication*, pp 91-94, Abril de 2004.
- [11] Gaetano Marrocco, "Gain-Optimized Self-Resonant Meander Line Antennas for RFID Applications", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. Vol 2, pp 302-305, 2003
- [12] Gerhard Weis, Andrew Lewis, Marcus Randall, Amis Galehdar y David Thiel, "Local Search for Ant Colony System to Improve the Efficiency of Small Meander Line RFID Antennas". *CEC 2008. (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*. 2008.
- [13] Amir Galehdar, David V. Thiel, Steven G. O'Keefe y Simon P. Kingsley, "Efficiency Variations in Electrically Small, Meander Line RFID Antennas", *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2007

-
- [14] Gaetano Marrocco, Alessandro Fonte y Fernando Bardati, "Evolutionary Design of Miniaturized Meander-Line Antennas for RFID Applications", *Proc. IEEE AP-S Int. Symp*, 2002
- [15] Naobumi Michishita y Yoshihide Yamada, "A Novel Impedance Matching Structure for a Dielectric Loaded 0.05 Wavelength Small Meander Line Antenna", *IEEE Antennas and Propagation Society, International Symposium*, Albuquerque, pp. 1347-1350, Julio 2006.
- [16] Gaetano Marrocco "RFID Antennas for the UHF Remote Monitoring of Human Subjects" *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol 55, pp 1862-1870, Junio 2007
- [17] Iulian Rosu, "PIFA – Planar Inverted F Antenna", <http://www.qsl.net/va3iul>, descarga: 20 de Octubre de 2010.
- [18] Chi Ho Cheng y Ross D. Murch, "Asymmetric RFID Tag Antenna", *Antennas and Propagation Society International Symposium*, pp 1363-1366, 2006
- [19] Abdi K.H. Obsiye, Hany E. AbdEl-Raouf y Rafique El-Islam "Design of a Compact Planar Inverted-F Antenna (PIFA) for RFID Applications", *IEEE International RF and Microwave Conference Proceedings*, pp 277-278, 2008
- [20] Gaetano Marrocco, "Body-Matched Antennas for Wireless Biometry", *European Conference on Antennas and Propagation*, pp 795, Nice Francia, Noviembre 2006
- [21] Gaetano Marrocco, "RFID Antennas for the UHF remote monitoring of Human subjects", *IEEE Transaction on, Antennas and Propagation*, vol 6, pp 1862-1870, Junio 2007
- [22] Gaetano Marrocco y C. Calabrese, "Automatic Design of Miniaturized Slot-Line RFID Antenna", *European Conference on Antennas and Propagation*, Edimburgo, Noviembre 2007
- [23] Mikko Keskilamm, Markku Kivikoski, "Using Text as a Meander Line for RFID Transponder Antennas", *Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 3, pp 372-374, 2004
- [24] J. Uddin, M. B. I. Reaz, M. A. Hasan, A. N. Nordin, M. I. Ibrahimy, M. A. M. Ali, "UHF RFID antenna architectures and applications", *Scientific Research and Essays*, vol. 5, pp 1033-1051, 18 Mayo 2010
- [25] Wonkyu Choi, H. W. Son, Chansoo Shin, Ji-Hoon Bae, Gilyoung Choi, "RFID tag antenna with a meandered dipole and inductively coupled feed", *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2006
- [26] Yuri Tikhov, Yongjin Kim, Young-Hoon Min, "Electrically Small Antenna for RFID and Wireless Sensor Transponders", *Proc. of International Symposium on Antennas and Propagation, ISAP2005*, Seoul, Korea, , vol. 3, pp. 1041-1044. Agosto, 2005
- [27] Dominique Paret, "RFID at Ultra and Super High Frequencies". Wiley. Inglaterra. 2009
- [28] Cosntantine A. Balanis, "Antenna Theory Analysis and Design", Wiley, Tercera Edicion, 2005.

-
- [29] J.A. Kuecken, "Antennas and Transmission Lines". USA: MFJ Enterprises, Inc., 1996.
- [30] Choo, H., and Ling, H. "Design of electrically small planar antennas using inductively coupled feed", *Electron. Lett.*, 39, pp. 1563–1565, 2003,
- [31] Hilberg Wolfgang, "Electrical Characteristic of Transmission Lines", *Artech House* 1979
- [32] Frederick W, "Inductance Calculations", *Dover Phoenix*. 1973.
- [33] Dobkin, D.M., Weigand, S.M., "Environmental effects on RFID tag antennas", *Microwave Symposium Digest, 2005 IEEE MTT-S International*, 31 octubre, 2005.
- [34] Pavel V. Nikitin, Sander F. Lam K. V. Seshagiri Rao, Rene Martinez, "Sensitivity and Impedance Measurements of UHF RFID Chips", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol 57, pp 1297-1302. Mayo 2009.
- [35] H.A. Wheeler, "Small antennas", *IEEE Transaction on, Antennas and Propagation*, vol 1, pp 715-718. Junio 2003.
- [36] ANSYS, "Ansoft HFSS- User Guide", *Ansys Inc*, 2009
- [37] "CST Studio Advance Topics", *CST-Computer Simulation Technology*, 2009
- [38] John L. Volakis, Chi-Chih Chen, Kyohei Fujimoto, "Small Antennas: Miniaturization Techniques & Applications", *McGraw-Hill*, 2010
- [39] Gaetano Marrocco, Alessandro Fonte, Fernando Bardati. "Evolutionary Design of Miniaturized Meander-Line Antennas for RFID Applications", *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, pp 362-365, 2002.
- [40] R. Fletcher, "Practical Methods of Optimization." Chichester, U.K: *Wiley Interci*, 1980.
- [41] Daniel. S. Weile and Eric Michielssen, "Genetic Algorithm Optimization Applied to Electromagnetics: A Review," *Antennas and Propagation*, vol. 45, no. 3, pp. 343-353, 1997.
- [42] Matías Ison, Jacobo Sitt, and Marcos Trevisan. (2005, Nov.) Departamento de Física Juan José Giambiagi. [Online]. www.df.uba.ar/users/mison/genetico.tar.gz, consulta realizada el 20 de Enero de 2011.
- [43] E. E. Altshchuler D.S Linden, "The design of Yagi antennas using a genetic algorithm", *USNC/URSI Radio Science Meeting*, p. 283, 1996.
- [44] R. Meys and F. Janssens, "Measuring the impedance of balanced antennas by an S-parameter method", *IEEE, Antennas and Propagation*, vol 40, no. 6, pp 62-65, Diciembre. 1998.
- [45] S. K. Kuo, S. L. Chen, C. T Lin. "An Accurate Method for Impedance of RFID Tags Antenna", *Progress In Electromagnetics Research. PIER*, pp-93-106, 2008.

[46] A. Ghiotto, T. P. Voun, K. Wu, "Chip Impedance Measurement for the Design of Passive UHF RFID Tag", *European Microwave Conference*, pp. 1086-1089, Paris Francia, 2010.

[47] Xianming Qing, Chean Khan Gah, Zhi Ning Chen, "Measurement of UHF RFID Tag Antenna Impedance." *IEEE Antenna Technology*, 2009

Capítulo 3

Propuestas de Diseño de Antenas de RFID.

En este capítulo, se seguirá el proceso de diseño presentado en el capítulo anterior, con el cual se proponen cuatro diseños distintos de antenas, cada uno con sus características propias, en cuanto al tipo de acoplamiento y forma.

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, el principal objetivo en el diseño de las antenas de RFID, recae en obtener la impedancia que se acople a los circuitos integrados (CI), los cuales tienen una resistencia baja y una reactancia capacitiva alta. Por ello, todas las antenas aquí presentadas, tienen algún tipo de acoplamiento, ya sea T o inductivo.

A lo largo del capítulo, se harán las pruebas de simulación de las cuatro antenas, dos de ellas en un principio con el simulador electromagnético CST studio, y el resto en con el simulador HFSS, el cual esta relacionado con un programa, que por medio de algoritmos genéticos (GA), optimiza las antenas propuestas. Este programa de GA, tiene la característica de que enlaza Matlab (que es un lenguaje de programación) con el simulador electromagnético.

Hay que señalar que todas las antenas son de tipo MLAs, una de ellas específicamente, se clasifica como de tipo texto, la cual tendrá la palabra “México” y que se propone como una opción para el reconocimiento de productos manufacturados en el país, generando así, una antena que no solo sea reconocida por medio de RF, si no que también es reconocida de forma visual por cualquier persona, como un sello de un producto mexicano.

Este capítulo sólo abarcará la parte de simulación y optimización, dejando la construcción y caracterización para el capítulo 4, permitiendo tratar estos dos procesos de forma ordenada y clara.

3.1 Requerimientos para las Antenas.

El objetivo es generar 3 antenas lineales serpenteadas, que cumplan con las siguientes características:

- Frecuencia de Operación: En el intervalo de 902-928 MHz, dado en la NOM121 [1].
- Campo de Operación: Mínimo de 16 metros, (Considerando que se tomará este parámetro como referencia de desempeño).
- Coeficiente de transferencia de energía : $\tau \approx 0.9$. Para asegurar una cobertura de 16 m.
- Impedancia del CI: Habrá dos opciones de circuito integrado. De las opciones de la tabla II, se seleccionan dos de los que cuentan con una impedancia similar: el Atmel ATA5590 con una impedancia de $6.7-j206 \Omega$ y el ST XRA00 con una impedancia de $6.7-j198 \Omega$.
- Dimensiones Máximas: 1.5 x 10 cm, para estar en el intervalo de las propuestas mostradas en el capítulo 2.
- Material: para la fabricación de la antena se utilizará cobre de 0.034 mm de espesor, sobre FR4 (Fibra de vidrio, con una $\varepsilon = 4.4$), el cual tiene 1.6 mm de espesor, material muy utilizado en la fabricación de circuitos impresos.

3.2 Propuestas de Diseño.

El siguiente paso, después de establecer los requerimientos de la antena, es el proponer la configuración de estas, las cuales se procederá a simular para obtener sus parámetros. Los diseños propuestos son los siguientes:

a) Antena 1.

La primer propuesta de diseño, se basa en la antena de la figura 2.9 (a), que esta diseñada para una impedancia de $6.2-j130 \Omega$.

La diferencia más clara en cuanto a la impedancia, se da en la parte reactiva, por lo que para aproximar el tamaño que se ajuste a los $-j198 \Omega$ del circuito integrado, se utiliza (2.11) y (2.12) por tratarse de un loop rectangular. En la figura 3-1, observamos los valores que toma la reactancia del loop (eje “y”) al variar los parámetros a y b (eje “x” superior e inferior) considerando un ancho de 1 mm (figura 2-15). Cabe señalar, que la reactancia que se va a obtener, puede variar debido al efecto del reflector, lo que se consigue de esta aproximación es reducir el espacio de búsqueda de las dimensiones del loop, para acoplar la parte reactiva.

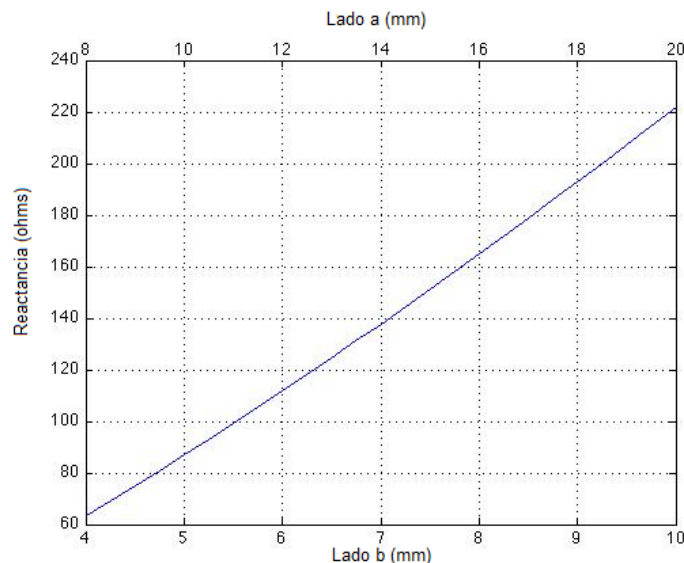


Figura. 3-1 Reactancia Teórica al Variar los Parámetros de un Loop Rectangular.

Una vez limitado la búsqueda de las dimensiones del loop, se propone el diseño que se muestra en la figura 3-2:

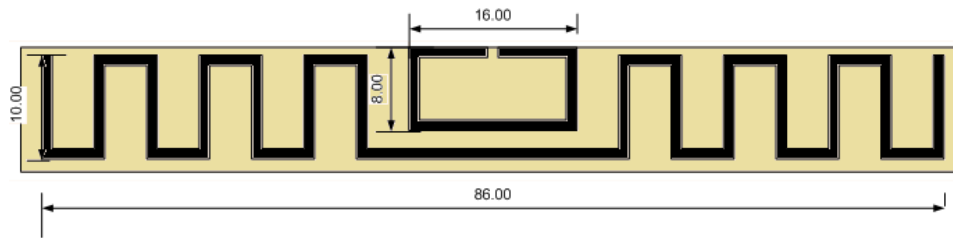


Figura. 3-2 Diseño Base para la Antena 1.

Este primer diseño, utiliza el acoplamiento inductivo, con un serpenteo simétrico, del cual obtenemos la respuesta siguiente (figura 3-3), en la gráfica, el eje “y” representa el parámetro S_{11} en dB, que nos permite determinar si existe un acoplamiento adecuado (debajo de -10 dB se considera que se radia más del 90 % de la energía entregada a la antena). Observamos que el acoplamiento se obtiene arriba de la frecuencia de operación deseada (902-928 MHz), por lo que esta primer aproximación no cumple con el requerimiento de la frecuencia. A partir de aquí, se procede a modificar sus parámetros, desde las dimensiones del loop, hasta la forma del reflector.

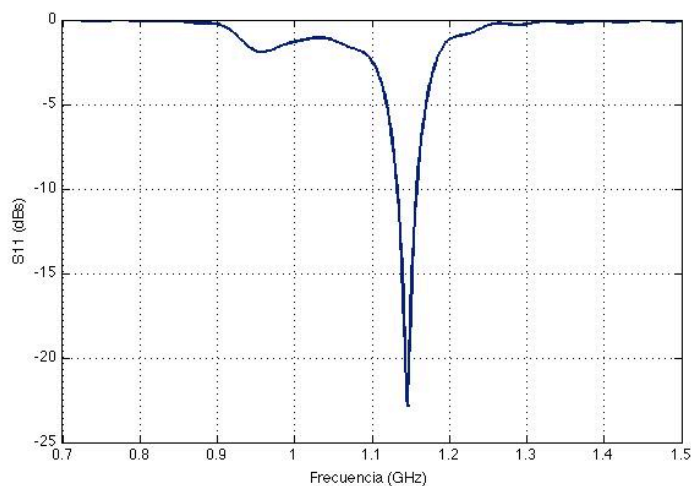


Figura. 3-3 Parámetro S_{11} , del la Antena 1.

Después de un proceso de entonación se obtiene la siguiente antena:

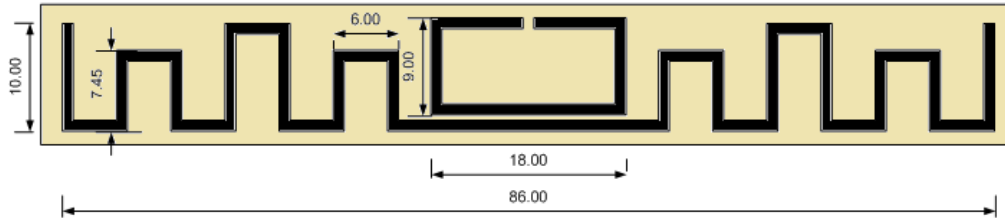


Figura. 3-4 Diseño de la Antena 1, Obtenido al variar sus dimensiones.

En la figura 3-5, observamos la respuesta que tiene el elemento, donde por medio de las variaciones físicas realizadas del primer prototipo, se consigue un acoplamiento a una frecuencia de 926 MHz.

Otros parámetros obtenidos por medio del CST Studio se muestran en la tabla IV:

Tabla IV Parámetros Obtenidos por Simulación de la Antena 1.

Parámetros	Valor Obtenido.
Ancho de Banda	13 MHz
Intervalo de Operación	909-922 MHz
Ganancia	1.85 dB
Coefficiente de Transferencia de Energía	0.95

En la figura 3-5 (a), podemos apreciar que se ha logrado que la antena opere en el intervalo de frecuencias deseado, resonando a 915 MHz. En la tabla IV se observa que se cumplen los requerimientos planteados, obteniendo un coeficiente de

transferencia de energía (τ) de 0.95 lo que combinado con la ganancia de 1.85 dB, de acuerdo a (1.1) nos da una campo de operación teórico de 18 m . En la figura 3-5 (b) se muestra el patrón de radiación, lo que muestra que la antena se comporta como un dipolo, radiando la energía de forma direccional.

Cabe señalar que el tiempo para obtener este resultado, es considerablemente largo, pasando por diferentes variaciones e intentos de entonación, ya que no existe un método preciso que permita reducir los tiempos de diseño. Por lo que a pesar de obtener los requerimientos sin necesidad de la optimización, se debe considerar que ese proceso, debe reducir el tiempo de búsqueda y proporcionar resultados favorables.

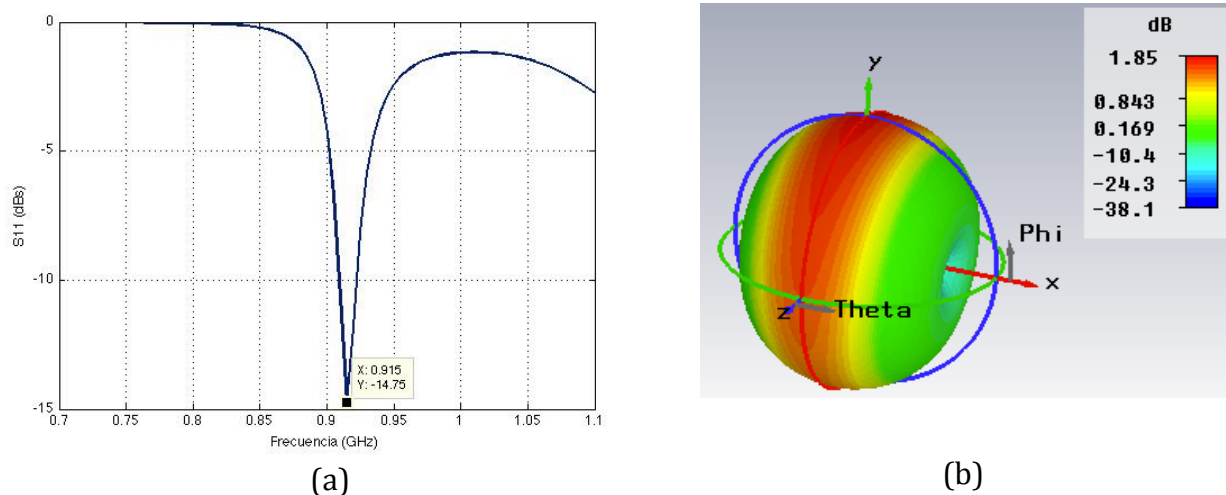


Figura. 3-5 Resultados de Simulación de la Antena 1,
(a) Parámetro S_{11} , (b) Patrón de Radiación.

b) Antena 2.

Siguiendo con las propuestas de diseño, nos centramos en una antena con acoplamiento T, que a diferencia de la anterior, se hace sin basarse en otro diseño ya existente. La principal diferencia recae, en hacer una reducción en el serpenteo, a medida que se acerca a los extremos de la antena. Esta propuesta se aprecia en la figura 3-6, la cual se simula en el programa HFSS.

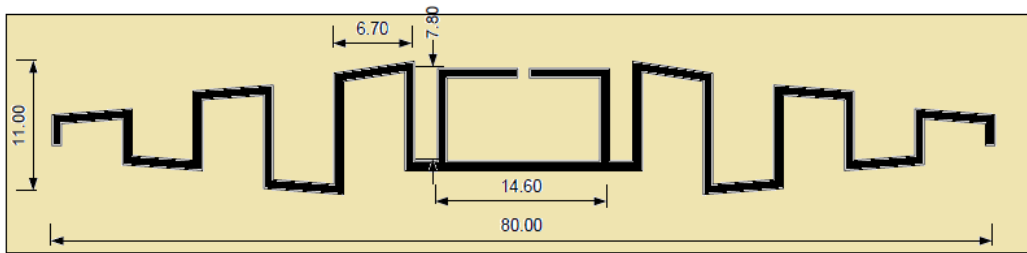


Figura. 3-6 Antena 2. Propuesta de Diseño.

Los resultados de la simulación se muestran en la tabla V:

Tabla V Parámetros Obtenidos de la Simulación de la Antena 2

Parámetros	Valor Obtenido.
Ancho de Banda	60 MHz
Intervalo de Operación	881-941 MHz
Ganancia	1.04 dB
Coefficiente de Transferencia de Energía	0.79

En la figura 3-7 observamos la respuesta de la antena 2. De la gráfica obtenemos, el punto de resonancia a 914 MHz, con un ancho de banda (considerando - 10 dB) de 60 MHz, sobrepasando la frecuencia mínima y máxima establecida en la NOM 121, pero que se mantiene dentro de lo establecido por la norma EPC [2], por lo que podría aprovecharse para utilizarse en regiones que operen en esos intervalos . El programa de simulación nos indica una ganancia de 1.04 dB, y determinamos un coeficiente de transferencia de energía (τ) en 0.79, lo cual está por debajo de los requerimientos solicitados, teniendo un campo de operación teórico de 15.09 m.

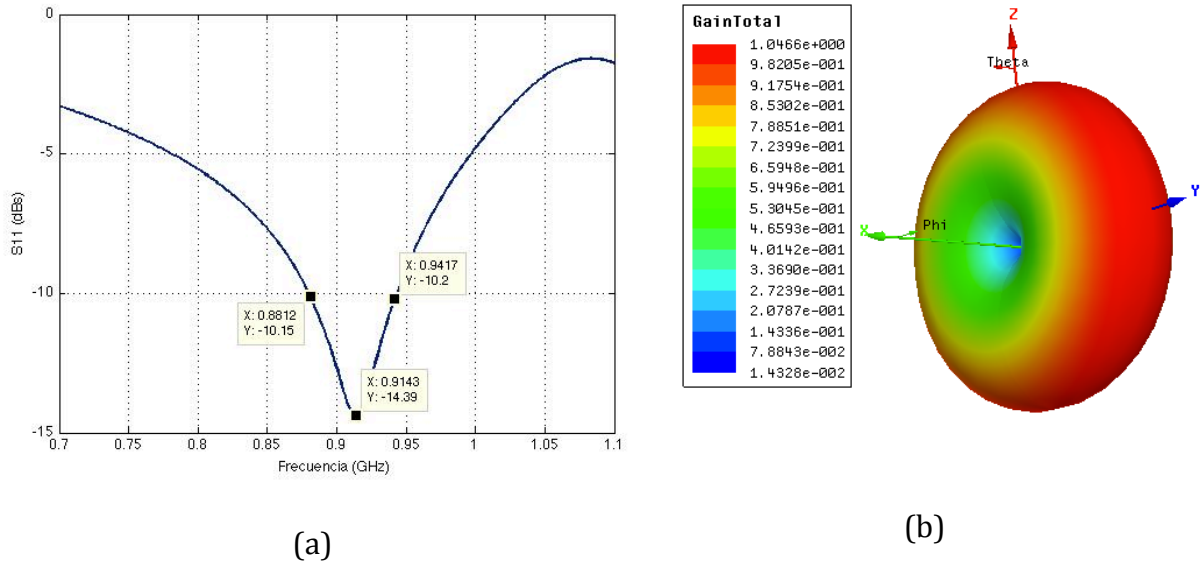


Figura. 3-7 Resultados de Simulación de la Antena 2, (a) Parámetro S_{11} , (b) Patrón de Radiación.

El hecho que no se cubran totalmente los requerimientos, no se descarta este diseño, ya que por medio del proceso de optimización, se pueden mejorar los parámetros requeridos, por lo que, esta antena se selecciona para los siguientes procedimientos.

c) Antena 3.

La tercera propuesta de diseño, es la de una antena tipo texto, con el logotipo “México”, que como se mencionó en el tema 2.1.4, las razones de utilizar estas antenas, pueden ser del tipo comercial, en donde tener una característica visual puede generar un distintivo sobre esos productos. Una desventaja de utilizar este tipo de antenas, es que se pierde la simetría, por lo que muchos efectos de segundo orden de líneas de transmisión (inductancias y capacitancias parasitas), no se anulan como se logra en las MLAs, lo que dificulta la búsqueda de una antena que se acople a los CI.

En la figura 3-8 se muestra la antena con el logotipo MEXICO, en la cual podemos ver como las letras se unen por la parte inferior y se aprovecha la letra X para formar un loop. El tipo de acoplamiento es diferente a los propuestos anteriormente, pero tiene un efecto similar.

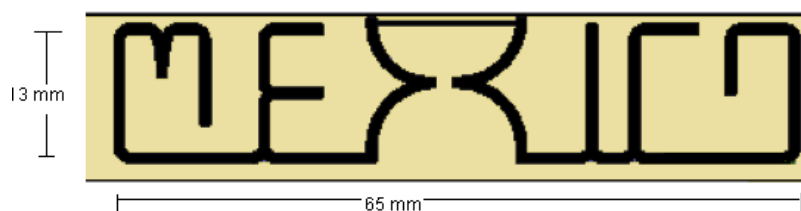


Figura. 3-8 Antena 3. Propuesta con Logotipo México

Los resultados de simulación del HFSS, se muestran en la tabla VI:

Tabla VI Parámetros Obtenidos de la Simulación de la Antena 4.

Parámetros	Valor Obtenido.
Ancho de Banda	122 MHz
Intervalo de Operación	820-942 MHz
Ganancia	0.9 dB
Coefficiente de Transferencia de Energía	0.71

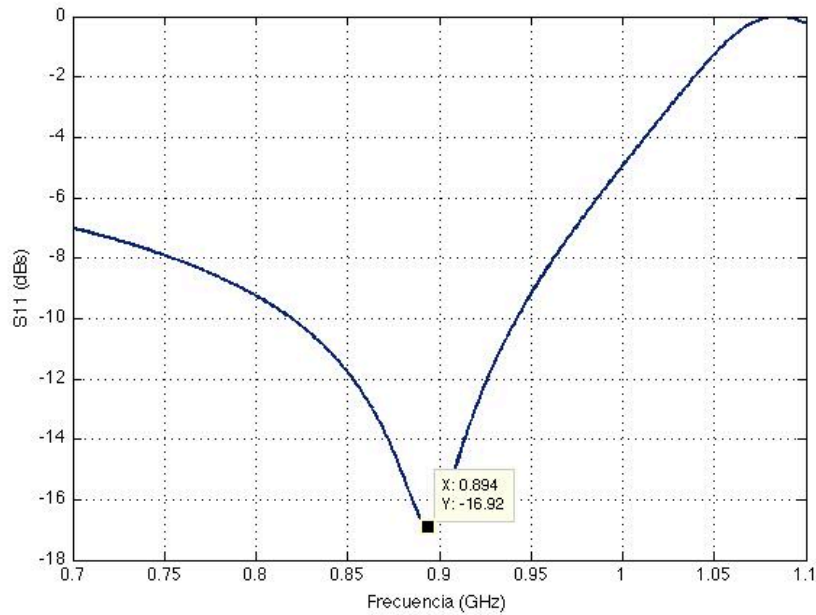


Figura. 3-9 Parámetro S_{11} de la Antena "México"

En la figura 3-9, observamos como la antena tiene su resonancia fuera del intervalo de los 902-928 MHz, aunque su ancho de banda si lo cubre. El problema encontrado en la respuesta de esta antena, es que sobrepasa el limite de la norma EPC que inicia a los 860 MHz, por lo que se requiere que la resonancia se recorra a una frecuencia más alta. En la tabla VI, se muestra como el coeficiente de transferencia de energía necesario no es alcanzado, lo que nos proporciona un campo de operación de aproximadamente 14 m, 2 m por debajo de lo requerido. Al igual que la antena 2, esta antena pasará a la siguiente etapa del proceso de diseño, que es la optimización.

3.3 Optimización.

El siguiente paso en el proceso de diseño, es la optimización de las antenas. Para llevar a cabo este proceso, se utiliza un programa generado en Matlab, que realiza las operaciones del algoritmo genético (GA) [3]. El diagrama de flujo se muestra a continuación.

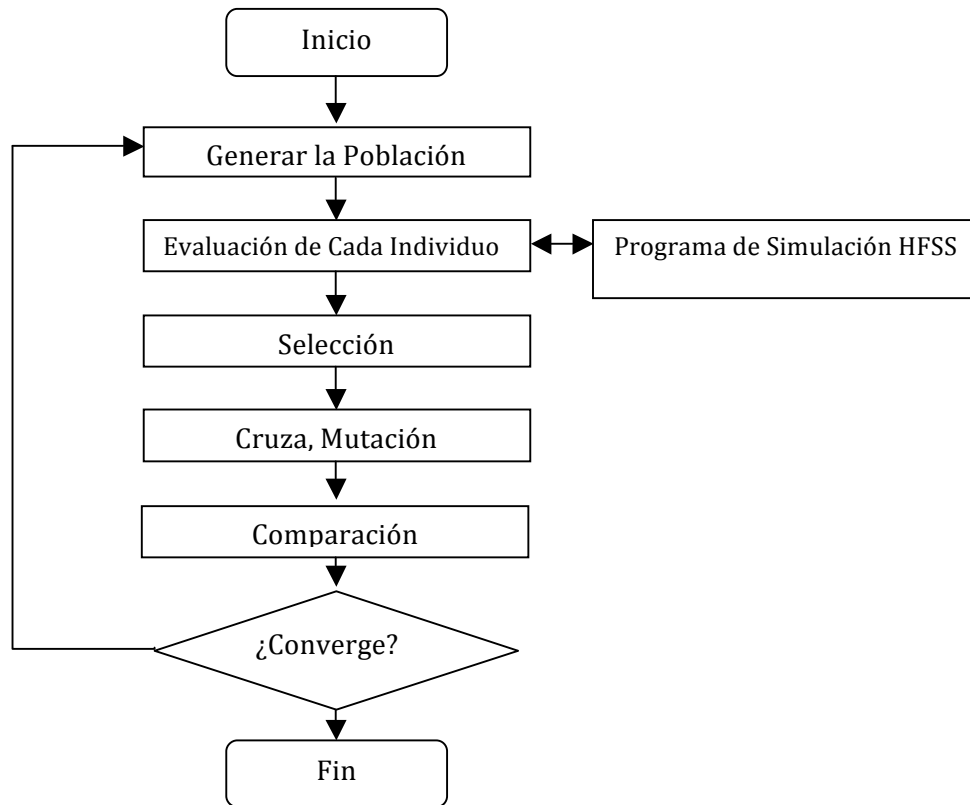


Figura. 3-10 Diagrama de Flujo del Programa del Algoritmo Genético.

Siguiendo los pasos del diagrama de flujo de la figura 3-10, se tiene que el primer paso es, darle forma a las antenas (Individuos), con segmentos (Genes) los cuales tendrán variaciones aleatorias, para generar una población inicial.

Este proceso se controla con las siguientes variables:

```

ocal = [ 0  0  0  0  0  8  6  ;...
        15 15 15 15  2 12 10 ];

resv = [0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1];
  
```

En la primera variable se considera la primer fila como los valores mínimos y los de la segunda fila los valores máximos (en este ejemplo, están dados en milímetros) que pueden tomar cada Gen. La segunda variable controla la resolución, es decir la

cantidad mínima en que pueden variar los genes. A partir de estos genes, se crean los individuos, para posteriormente comenzar con el proceso de selección.

Los siguientes parámetros que se seleccionan son:

fobj = 'FOS11';	%Valor de la FO esperado
sFO = str2func(fobj);	%Número de generaciones
FO = 1e-3;	
gn = 50;	
crz = 0.85;	%Probabilidad de cruza
fcrz = 4/nvmtn = 0.1;	%Fracción de cruza
fmtn = 2/nv;	%Probabilidad de mutación
mtn=0.1;	%Fracción de mutación
eli = 2/ni;	%Fracción de Elitismo
mig = 0.1;	%Migración
sta = 0.50*gn;	%Estancamiento
ncd = 1;	%Número de corridas

Para la Función Objetivo (FO), se utilizan dos variables “fobj”, y “FO”, la primera toma el nombre de una función creada en MATLAB (FOS11), en la cual se obtendrán los resultados de la simulación de las antenas y se harán los cálculos para determinar el valor de la Función Objetivo. La variable “FO” nos permite determinar la precisión a la cual deseamos llegar con la optimización, es decir por debajo de que valor, consideramos que se tiene un resultado satisfactorio.

La función objetivo propuesta para este sistema es la siguiente:

$$Fo = \frac{|R_A - R_{CI}|}{R_{CI}} + \frac{|X_A - X_{CI}|}{X_{CI}} + \frac{|f_1 - f_2|}{f_2} \quad (3.1)$$

Donde:

$$Fo \approx 0$$

R_A - Resistencia de la Antena.

R_{CI} - Resistencia del Circuito Integrado.

X_A	- Reactancia de la Antena.
X_{CI}	-Reactancia del Circuito Integrado
f_1	- Frecuencia donde el producto de las resistencias es más próximo a cero
f_2	- Frecuencia donde el producto de las reactancias es más próximo a cero

La función objetivo busca el mejor acoplamiento entre la antena y el circuito integrado que se conecta a ella, por ello se busca que la diferencia tanto en la resistencia como en la reactancia, sean mínimas y en frecuencias cercanas.

Los otros parámetros controlan los valores de los operadores básicos del GA, permitiendo determinar la probabilidad del cruzamiento y de mutación, y en que porcentaje se modificaran los individuos, es decir la cantidad de genes que se intercambiaran o que pueden mutar. La ventaja de este programa, es que podemos determinar cada uno de estos parámetros para que se ajusten a nuestras necesidades.

En la figura 3-11 se da un ejemplo de cómo el programa busca en cada intervalo de frecuencia la resistencia (en color rojo) y la reactancia (en azul). Proceso en el cual, se obtienen las diferencias, entre la impedancia de la antena y la impedancia del CI y a su vez que estos valores sean próximos en frecuencia, es decir que la diferencia mínima de la resistencia, este en una frecuencia próxima a la diferencia mínima de las reactancias. Como las antenas se diseñan para UHF se limita la búsqueda de 902 a 928 MHz, aunque se puede seleccionar otro intervalo de frecuencia, para casos específicos.

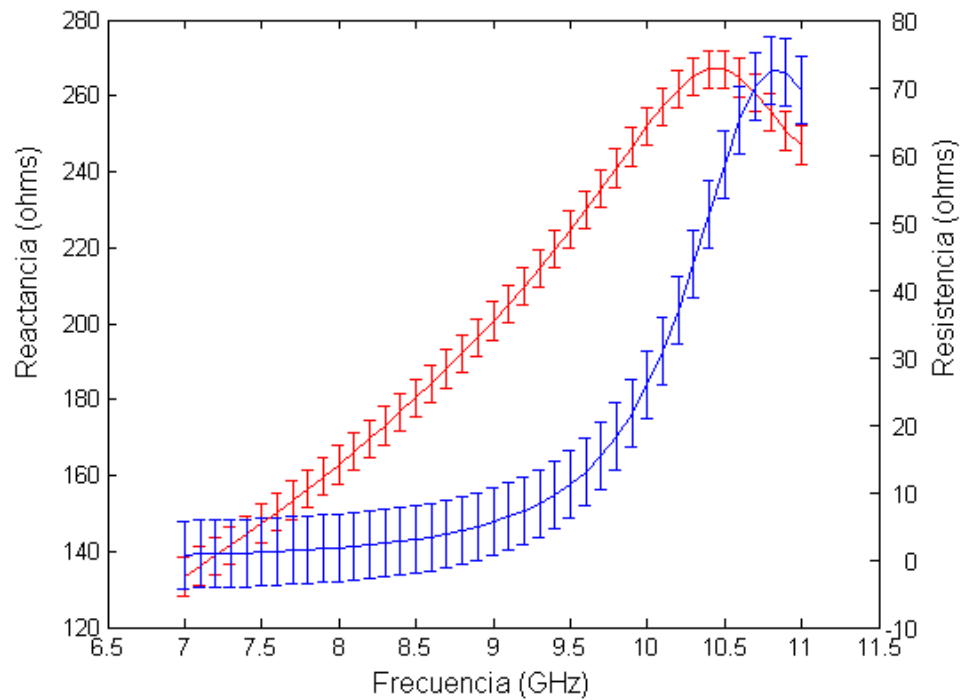


Figura. 3-11 Esquema de la Búsqueda Realizada por el Algoritmo Genético.

Una vez generada la población se procede a la evaluación de los individuos, para ello en la función de FOS11 tenemos:

```
simu=S11HFSS2(As1, As2, As3, As4, sep, lp1, lp2, rm);
```

Esta función se encarga de la conexión con el simulador HFSS, los parámetros que se envían, varían dependiendo el numero de genes que se desea modificar. Los datos enviados les dan las características físicas a los individuos.

En la función “simu” se generan los comandos para operación del simulador electromagnético, los cuales crean el código de Visual Basic Script (VBS). Para ello se tomaron los comandos obtenidos del manual de control de VBS en HFSS [4] y algunos toolbox creados por Vijay Ramasami [5].

El esquema general de cómo opera el sistema, se muestra a continuación:

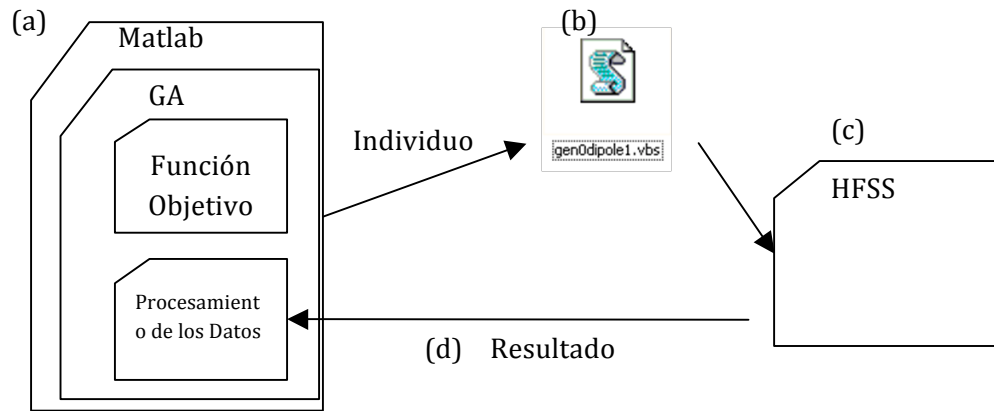


Figura. 3-12 Diagrama Esquemático de la Operación del Algoritmo Genético

Los procesos que se muestran en la figura 3-12 se describen; utilizando un ejemplo del diseño de una antena:

- a) Al inicio del programa seleccionamos, si se construye una antena genérica por medio de comandos o se carga un archivo existente de HFSS, en el cual debemos dar de alta las variables a modificar.

En caso de seleccionar la construcción de una antena genérica, se debe seleccionar el tipo de acoplamiento, así como la impedancia del circuito integrado a la que se desea acoplar.

Una vez asignado estos valores, se procede a la generación de los individuos, para su posterior simulación. La cantidad de genes dependerá del número de variables que deseamos modificar, para este ejemplo tenemos en la figura 3-13 un cuadro con los genes de una antena de prueba:

Serpenteo 1	Serpenteo 2	Serpenteo 3	Serpenteo 4	Separación	Alto del Loop	Ancho del Loop
-------------	-------------	-------------	-------------	------------	---------------	----------------

Figura. 3-13 Esquema de los Genes que Conforman el Diseño de una MLA.

- b) Una vez que se ha generado un individuo, se crea el archivo de VBScript, el cual contienen las instrucciones necesarias para la manipulación del simulador HFSS.
- c) En este bloque, el simulador utiliza los datos para la construcción y simulación de la antena:

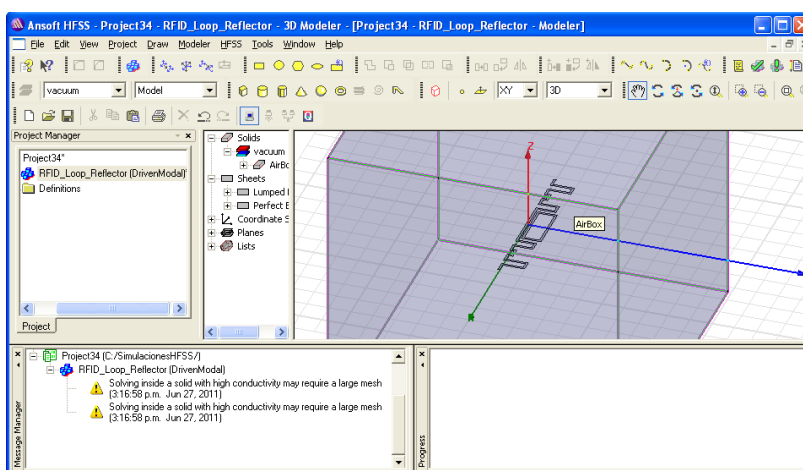


Figura. 3-14 Simulación de una Antena con Valores Dados por el Algoritmo Genético.

En la figura 3-14, se observa la antena sin ningún tipo de sustrato detrás de ella, pero esto no quiere decir que el programa no los pueda generar, existe una sección dedicada a la construcción del sustrato, la cual se muestra a continuación:

```
%Sustrato
hfssBox(fid, 'Sustrato', [-40, -10, 0], [80, 30, 0.2], 'mm');
%hfssAssignMaterial(fid, 'Sustrato', 'polyethylene');
hfssAssignMaterial(fid, 'Sustrato', 'FR4_epoxy');
```

En esta sección del programa se pueden agregar diferentes tipos de sustrato, aunque respetando el nombre dado, dentro del simulador HFSS para cada uno de ellos.

Otro elemento que se crea a partir del programa, y que permite realizar la simulación, son las condiciones de frontera, en este caso representadas por un cubo de aire, al cual se le dan unas dimensiones de media longitud de onda en la parte delantera y trasera de la antena y media longitud de onda contando desde los extremos de la antena.

Una vez terminada la simulación, los datos se exportan directamente en un archivo de Matlab.

- d) El procesamiento de los datos se da una vez que se cierra el simulador y se genera el archivo Matlab, estos datos contienen el coeficiente de reflexión, en formato complejo como se muestra en la figura siguiente:

```
S(1, :, :) = [ 7.233705E-001 + 6.848071E-001i];
S(2, :, :) = [ 7.253752E-001 + 6.826126E-001i];
S(3, :, :) = [ 7.273667E-001 + 6.804182E-001i];
S(4, :, :) = [ 7.293450E-001 + 6.782240E-001i];
S(5, :, :) = [ 7.313103E-001 + 6.760299E-001i];
```

Figura. 3-15 Datos Exportados por el Simulador.

En la figura 3-15 se muestran los datos del S_{11} , a la izquierda se marca el número del parámetro que corresponde a una frecuencia dada, lo siguiente es la forma compleja del parámetro S_{11} , con su componente real e imaginaria.

Con estos datos, utilizamos (3.2) para obtener la impedancia de la antena:

$$Z_A = \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} Z_0 \quad (3.2)$$

Donde:

Z_A - Impedancia de la Antena
 S_{11} - Coeficiente de Reflexión.
 Z_0 - Impedancia Característica.

Con esta ecuación podemos obtener, tanto la parte real como la imaginaria.

3.2.1 Prueba del Algoritmo Genético.

Con el fin de comprobar el funcionamiento del GA, se propone diseñar una antena, con la misma técnica aplicada en la antena 1, es decir, acoplamiento inductivo y serpenteo en el reflector. En este caso permitiendo una variación más amplia, tanto en el tamaño del loop, como en el de los serpenteos.

Se realizaron 4 pruebas diferentes, en las cuales se busca acoplar al circuito con impedancia de $6.7-j206 \Omega$, cada una con parámetros distintos, los cuales se muestran en la tabla VII.

De la tabla VII podemos concluir, que un mayor numero de individuos, nos permite obtener mejores resultados, esto se debe a que existe más diversidad genética, por lo que hay más probabilidades que entre la población existan individuos que por sí solos o al combinarse con otros, logren evolucionar a un punto que se tenga un mejor resultado.

Tabla VII Pruebas Realizadas con el Algoritmo Genético.

Parámetros	Genético 1	Genético 2	Genético 3
Número de Individuos	40	80	100
Generaciones	10	20	40
Mutación	0.08	0.08	.1
Fracción de Mutación	0.28	0.28	0.3
Estancamiento	9	19	25
Función Objetivo	0.02	0.015	0.0067

La antena que se obtuvo, del algoritmo genético, con la FO de 0.0067 se muestra en la figura 3.16.

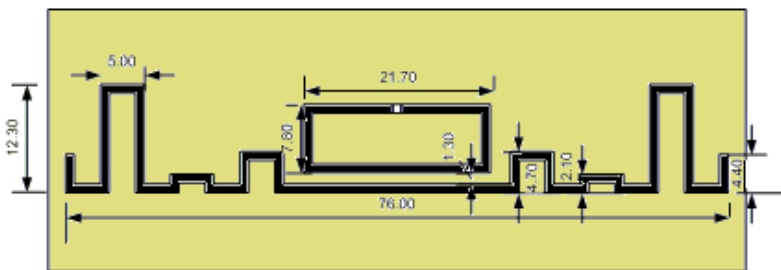


Figura. 3-16 Antena 4. Generada por el Algoritmo Genético

La antena 4 cuyos parámetros se muestran en la figura 3-16, es una solución de muchas posibles soluciones, ya que de los algoritmos genéticos se pueden tomar diferentes caminos en el proceso de evolución, en este caso en especial, los serpenteos son distintos unos de otros, y el loop se hizo mas largo en comparación al de la Antena

1. Del proceso de simulación, la impedancia de entrada que se obtuvo se muestra en la figura 3-17:

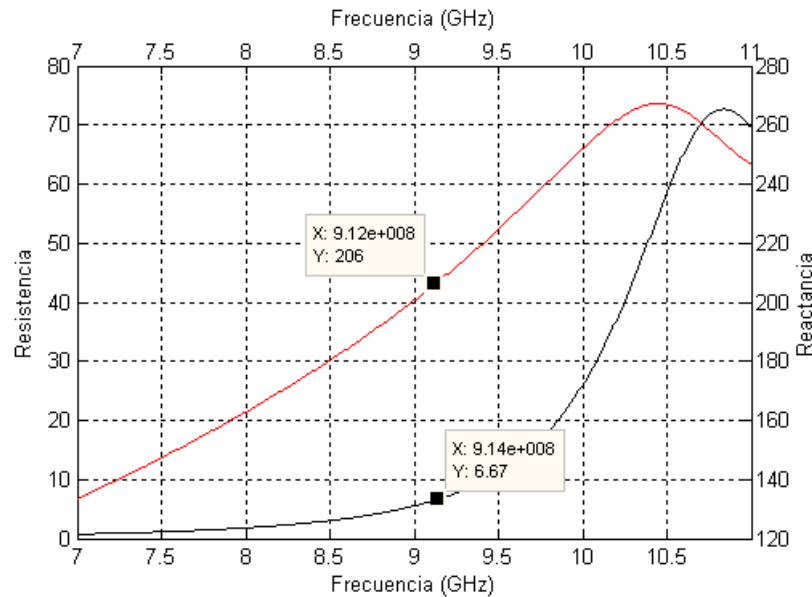


Figura. 3-17 Impedancia de Entrada de la Antena 4.

En la gráfica de la figura 3-17, la línea roja representa la reactancia y la negra la resistencia, en la cual se puede ver que la separación entre la resistencia deseada y la reactancia deseada es de 2 MHz.

Por medio de (1.2) calculamos el coeficiente de transferencia de energía, tomando como base la frecuencia de 912 MHz, donde se acopla perfectamente la reactancia y en ese mismo punto tomamos la resistencia, que tiene un valor de 6.45 Ω , obteniendo:

$$\tau = \frac{4 * 6.7 * 6.45}{|(6.7 - j206) + (6.45 - j206)|^2} = 0.9996 \quad (3.2)$$

En (3.2) vemos que técnicamente tenemos un acoplamiento de 1, que es el valor ideal del coeficiente de transferencia de energía. En cuanto a los parámetros obtenidos en simulación se muestran en la figura 3.18 y en la tabla VIII.

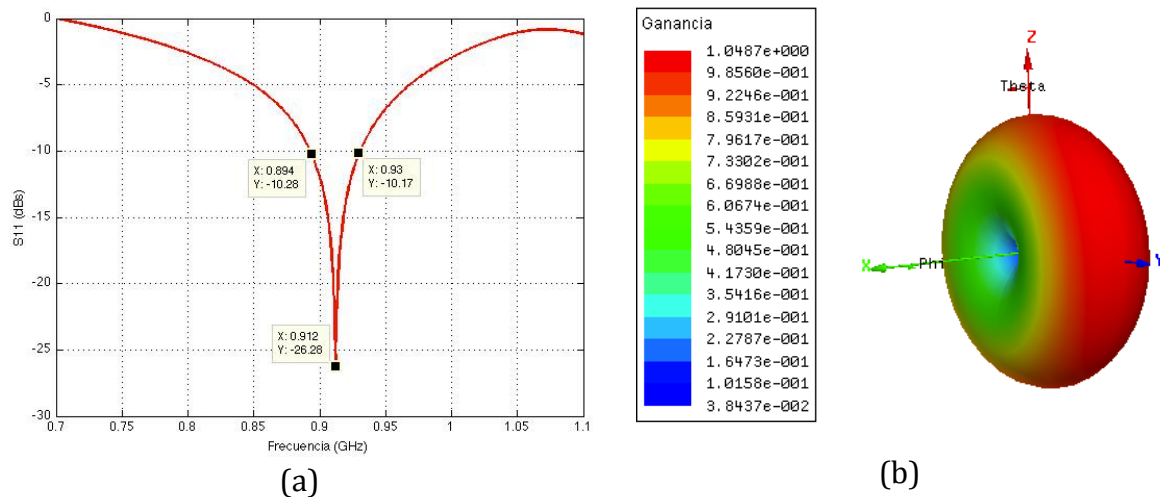


Figura. 3-18 Resultados de Simulación de la Antena 4, (a) Parámetro S₁₁, (b) Patrón de Radiación.

Tabla VIII Parámetros de la Antena 4.

Parámetros	Valor Obtenido.
Ancho de Banda	36 MHz
Intervalo de Operación	894-930 MHz
Ganancia	1.048 dB
Coeficiente de Transferencia de Energía	0.99

En la figura 3-18 (a), podemos observar como el acoplamiento se da en los 912 MHz, que es la frecuencia donde la parte reactiva de la antena se acopla con la reactiva del circuito integrado. Otro parámetro importante que se cubre, es el ancho

de banda, que abarca el intervalo de frecuencias requerido. En la figura 3.19 (b) observamos el patrón de radiación de la antena, el cual representa una patrón de una antena dipolo, teniendo nulos en los extremos de la antena. Los parámetros obtenidos por simulación se muestran en la tabla VIII, mostrando el ancho de banda, la ganancia y el coeficiente de transferencia de energía, calculado anteriormente.

Cabe señalar que para alcanzar los objetivos con esta antena se requirió de 4 días de diseño y optimización, considerando aproximadamente un día por cada proceso de la tabla VII.

3.2.2 Optimización de las Antenas Propuestas.

Una vez que se ha probado el funcionamiento del programa del algoritmo genético, se procesa a la optimización de las antenas propuestas.

La antena 1 no se considera para el proceso de optimización debido a que ya cumple con los requerimientos planteados, además de que fue diseñada sobre el simulador electromagnético CST y requiere de ajustes para poder hacer una comparación adecuada, entre éste y el simulador HFSS.

3.2.2.1 Optimización de la Antena 2.

La optimización de la antena 2, por medio del algoritmo genético, nos permite probar otra funcionalidad del programa, el cual permite manipular un archivo existente del simulador HFSS, en este caso el archivo de la antena 2, en el cual uno tiene que dar de alta algunas variables que controlen las dimensiones físicas de algunas secciones de la antena.

Una vez expuesta la forma en que se ejecutará el GA, se muestra en la tabla IX los parámetros que se dieron para la optimización de la antena 2.

Tabla IX Parámetros Utilizados en la Optimización de la Antena 2.

Parámetros	
Individuos	100
Probabilidad de Mutación	0.1
Porcentaje de Cruza	0.3
F.O	0.062

Los parámetros mostrados en la tabla IX, muestran los que consiguieron la mejor función objetivo. Los resultados obtenidos después del proceso de optimización se aprecian en la figura 3-19. En 3-19 (a) observamos que la frecuencia de resonancia cambio de 914 a 917 MHz, así como una disminución en el ancho de banda, pero el cual sigue cubriendo el intervalo de operación deseado. En este caso sin superarlo por un gran margen, con aproximadamente 6 MHz en la parte superior y 2 en la inferior. En 3-19 (b) se observa que la ganancia incremento levemente y se mantiene el comportamiento de una antena dipolo. Los resultados completos se muestran en la tabla X, en donde podemos observar el pequeño incremento en la ganancia, así como el incremento del coeficiente de transferencia de energía, el cual no logro llegar a 0.9, quedando así. Considerando este parámetro y la ganancia se obtiene un campo de operación teórico de 15.77 metros, lo cual podríamos considerarlo aceptable. Cabe mencionar que se hicieron distintas pruebas con el GA, pero se llego a la conclusión que se tendría que alterar demasiado las dimensiones y se perdería la forma que caracteriza a esta antena. La antena termino como se muestra en la figura 3-20, alterando un poco el tamaño del acoplamiento T.

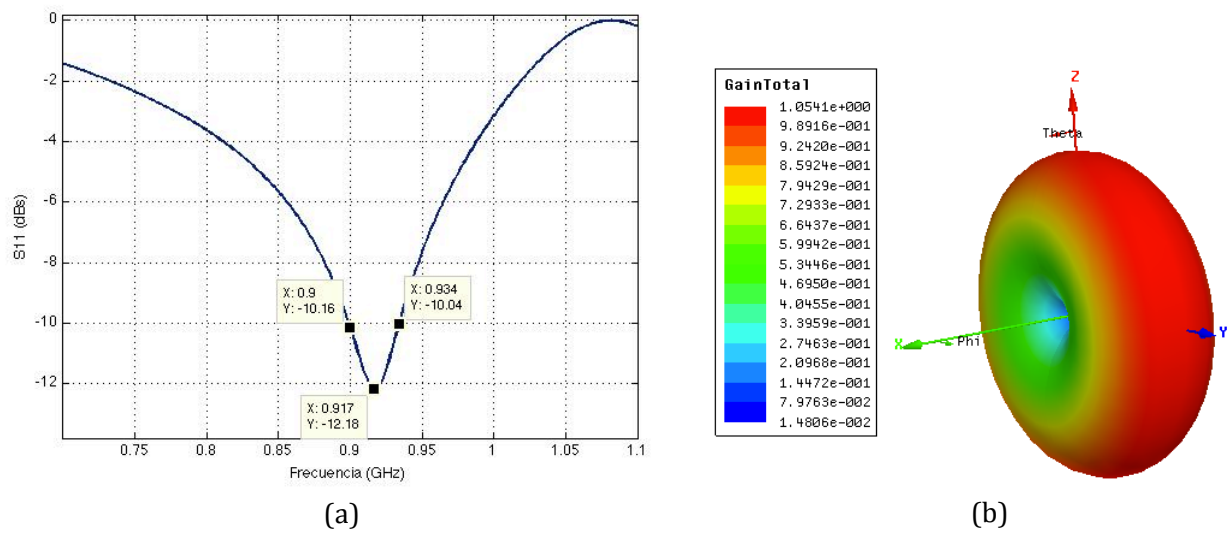


Figura. 3-19 Resultados de Simulación de la Antena 2 optimizada, (a) Parámetro S_{11} , (b) Patrón de Radiación.

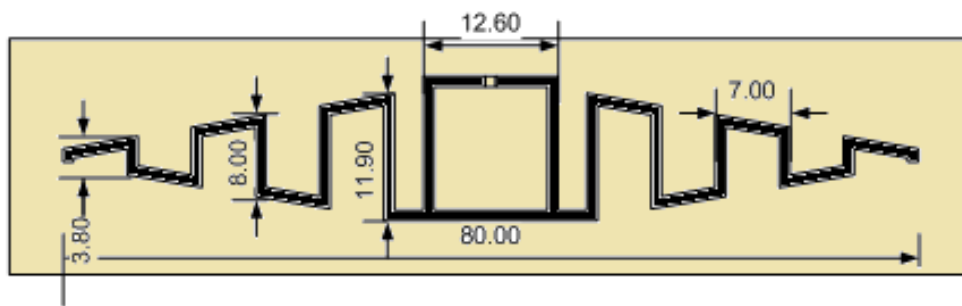


Figura. 3-20 Antena 2 Optimizada.

Tabla X Parámetros de la Antena 2 Optimizada.

Parámetros	Valor Obtenido.
Ancho de Banda	34 MHz
Intervalo de Operación	900-934 MHz
Ganancia	1.051 dB
Coeficiente de Transferencia de Energía	0.86

3.2.2.2 Optimización de la Antena 3.

La optimización de la antena 3, se da bajo el enfoque de mantener lo mas posible la forma de la palabra México, lo que limita la cantidad de genes que pueden modificarse. Los parámetros de la optimización de la antena 3 son los siguientes.

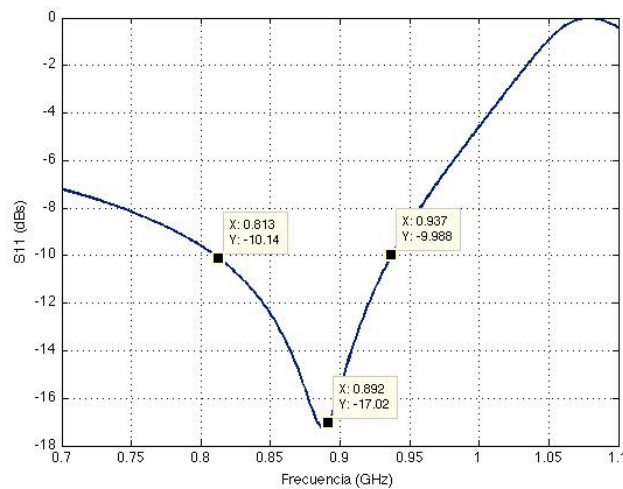
Tabla XI Parámetros de la Optimización de la Antena 3.

Parámetros	
Individuos	100
Probabilidad de Mutación	0.1
Porcentaje de Cruza	0.3
F.O	0.092

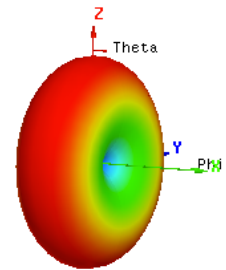
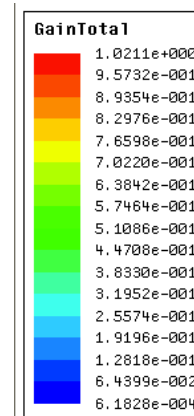
La antena resultante presenta los siguientes resultados:

Tabla XII Parámetros Obtenidos de la Antena 3,
Después del Proceso de Optimización.

Parámetros	Valor Obtenido.
Ancho de Banda	119 MHz
Intervalo de Operación	815-934 MHz
Ganancia	1.021 dB
Coefficiente de Transferencia de Energía	0.73



(a)



(b)

Figura. 3-21 Resultados de Simulación de la Antena 3 después de la Optimización, (a) Parámetro S_{11} , (b) Patrón de Radiación.

Como se puede observar en la figura 3-21, la respuesta de la antena en cuanto a su ancho de banda tuvo una leve disminución de 3 MHz, en cuanto a los otros parámetros, se observó una mejora en la ganancia y el coeficiente de transferencia de energía, aunque no lo suficiente como para llegar a los requerimientos. Esto se debe

en parte a que, el compromiso de mantener la forma de la antena, limita las posibilidades de búsqueda, por lo que el GA no logra la optimización deseada. Otro punto indeseable de la antena es que su ancho de banda sobrepasa el establecido por la EPC.

Esta antena a pesar de no cumplir con el total de los requerimientos, sigue siendo una buena alternativa para utilizarla en aplicaciones que no requieran de más de 15 metros de campo de operación, aunque se debe buscar limitar el ancho de banda de operación.

3.4 Conclusiones.

En este capítulo se inició el proceso de diseño para las antenas de RFID. En él, se pudo ver claramente la ventaja de plantear de un inicio los requerimientos de las antenas, por que permite tener un objetivo claro de que es lo que se quiere alcanzar y se buscan las alternativas para conseguirlo.

En esta parte del proceso de diseño, se generaron 4 antenas, una de ellas basada en un modelo ya existente, el cual fue adaptado a las condiciones del circuito integrado que se propuso, esta antena consiguió uno de los mejores resultados en cuanto a ganancia y acoplamiento, aunque como se mencionó, es la antena que más tiempo de diseño requirió, al ser optimizada mediante simulación, haciendo distintas variaciones, que al final permitieron obtener los requerimientos que se establecieron al inicio.

El diseño de la segunda antena, se ideó con el fin de probar una técnica de reducción de tamaño en los extremos, que en algunas aplicaciones (no en RFID) se aplican con el fin de conseguir un ancho de banda amplio, lo que en un principio se consiguió, al igual que una buena aproximación, al coeficiente de transferencia de energía solicitado. Esta antena si se sometió al proceso de optimización, que permitió una mejora en cuanto al coeficiente de transferencia de energía y una leve mejora en

la ganancia, lo que por otro lado redujo el ancho de banda de la antena, pero el cual no dejó de cubrir el intervalo de frecuencias que marca la norma NOM 121.

La tercer antena, con un logotipo pensado para la identificación de productos manufacturados en el país, se tienen todavía que realizar mejoras, ya que al tratar de preservar la forma, no se consigue una mejora significativa al introducirlo en el proceso de optimización. Algo en lo que se puede destacar, es que se consiguió un amplio ancho de banda, aunque superando la norma establecida.

En cuanto a la cuarta antena que fue generada a partir de la prueba de funcionalidad del algoritmo genético, se puede decir que al tener la libertad de modificar cada una de sus dimensiones con libertad, consiguió el mejor coeficiente de transferencia de energía, siendo el más próximo al valor óptimo. Por lo que por medio de esta antena, al igual que por la antena 2, se puede apreciar el valor de esta herramienta, como una buena opción que permite la optimización de estructuras, ya sean antenas de RFID, como otro tipo de estructuras electromagnéticas, por medio de la interacción del programa del algoritmo genético y del simulador electromagnético HFSS.

Referencias.

- [1] Comision Federal de Telecomunicaciones, Norma Oficial Mexicana NOM-121-SCT1-2009, Telecomunicaciones-Radiocomunicación-Sistemas de radiocomunicación que emplean la técnica de espectro disperso- Equipos por salto de frecuencia y por modulación digital a operar en las bandas 902-928 MHz, 2400-2483.5 MHz y 5725-5850 MHz- Especificaciones, límites y métodos de prueba., June 21, 2010.
- [2] EPCGlobal Inc. "EPCglobalTag Data Standards" Princeton Pike Corporate Center Version 1.3, 18 de Marzo 2006.
- [3] A. Rangel-Merino, J. L. López-Bonilla, R. Linares y Miranda, "Optimization Method Based on Genetic Algorithms," *APEIRON* Vol.12, No. 4, pp 293-408 Revista Electrónica ISSN 0843-6061, http://redshift.vif.com/journal_archives.htm. Oct. 2005
- [4] "Introduction to Scripting in HFSS", *Ansoft Corporation*, Diciembre 2007
- [5] Vijay Ramasami, "HFSS-MATLAB-API", "Free Software Foundation, Inc". 2004.

Capítulo 4

Caracterización de las Antenas.

En el capítulo anterior, se realizaron los diseños de las propuestas de las antenas de RFID, cada una de ellas optimizada para cubrir los requerimientos establecidos, por medio de un proceso de simulación. Hay que recordar que la caracterización es el último paso del diseño de las antenas de RFID, antes de determinar si la antena es apta o se tiene que rediseñar.

Como se mencionó en el tema 2.3.6, uno de los parámetros más importantes que se deben de medir, es la impedancia de la antena. Ya que el desempeño de la etiqueta recae, en gran parte en el acoplamiento entre ésta y el circuito integrado.

El primer punto que se toca, es la construcción de los prototipos, los cuales deben de presentar la menor cantidad de errores en su fabricación, para evitar de esta forma, que existan diferencias muy marcadas, entre lo simulado y lo medido. Más adelante se muestra el método de medición, los pasos y requerimientos necesarios para llevarlo acabo, reduciendo al mínimo los posibles errores en la medición.

A lo largo del capítulo, se mostrarán los resultados obtenidos de la caracterización de las antenas, así como la medición del patrón de radiación y ganancia de una de ellas. La medición que se realizara dentro de una cámara anecoica, permitiendo así, tener una medición libre de interferencia.

Al final se tomarán las conclusiones sobre cada una de las antenas y en sí sobre el proceso de diseño planteado en este trabajo de Tesis.

4.1 . Construcción de los Prototipos.

Para la construcción de los prototipos, se utiliza una placa de FR4, utilizada en la fabricación de circuitos impresos, la cual tiene un ancho de 1.6 mm, una permitividad $\epsilon = 4.4$ y cuenta con una capa de cobre de 0.034 mm de espesor, parámetros ya considerados en la simulación de las antenas.

Para construir las antenas, se utiliza una maquina de fresado, disponible en el laboratorio de compatibilidad electromagnética, la cual tiene una precisión de 0.1 mm, lo que permite construir las antenas con una gran precisión.

Las antenas construidas se muestran en la figura 4.1

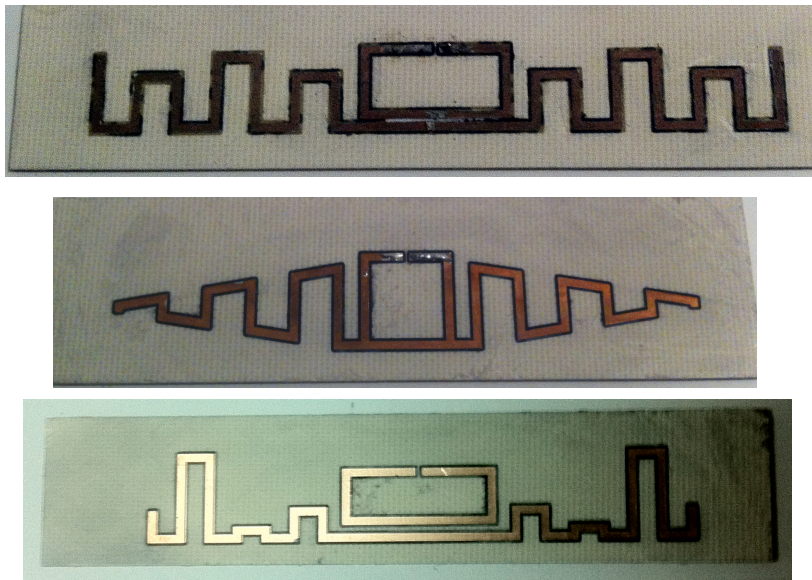


Figura. 4-1 Antenas Construidas sobre FR4.

En la figura 4-1, se muestran tres antenas construidas, las que presentaron los mejores resultados en el proceso de simulación y optimización.

4.2 Proceso de Medición de la Impedancia.

Para la medición de la impedancia de las antenas, se utiliza el método de la medición diferencial, descrito previamente en el tema 2.3.6. Este método por medio del análisis de los parámetros S, permite obtener los valores de forma indirecta. Una de las ventajas que obtenemos al emplear este método, es el poder medir la impedancia de antenas no simétricas [1], como es el caso de la antena con el logotipo de “México”, así como reducir los efectos de los cables por medio de la calibración de estos. Este proceso se describe a continuación.

4.2.1 Calibración del Sistema de Medición.

El primer paso para la medición, es construir un arreglo hecho con cables semirrígidos, los cuales se soldán uno con otro por medio de la malla que los cubre, este arreglo se muestra en la figura 4.2. El arreglo cuenta con conectores SMA para poder proporcionar una mejor calidad en la medición. Estos conectores están diseñados para presentar una impedancia característica de 50Ω .

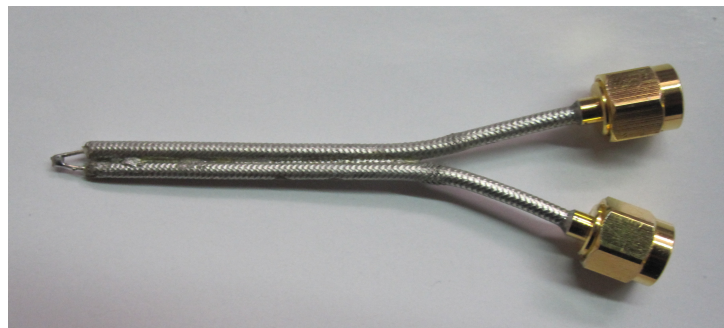


Figura. 4-2 Cable Semirrígido Utilizado en la Técnica de Medición Diferencial

El siguiente paso, es el de la calibración del sistema, un esquema se muestra en la figura 4-3, en el cual se muestran dos planos de calibración, uno antes del arreglo de los cables, y el segundo, después de este. En la parte derecha del esquema, se muestra la foto del arreglo conectado al analizador de redes Agilent PNA-X N5244A.

Para realizar la calibración del analizador de redes se siguen los siguientes pasos:

1. Realizar la calibración normal del equipo, en sus dos puertos, utilizando, Abierto, Corto y Carga.
2. Para eliminar los efectos del arreglo de cables, se realiza la “extensión de puerto”, un proceso de calibración integrado en el analizador de redes PNA-X. En el manual del equipo [2], se explican los pasos a seguir para una calibración manual, o una calibración automática. En este caso se utiliza la calibración automática, que se realiza poniendo en abierto o en corto los cables del arreglo.

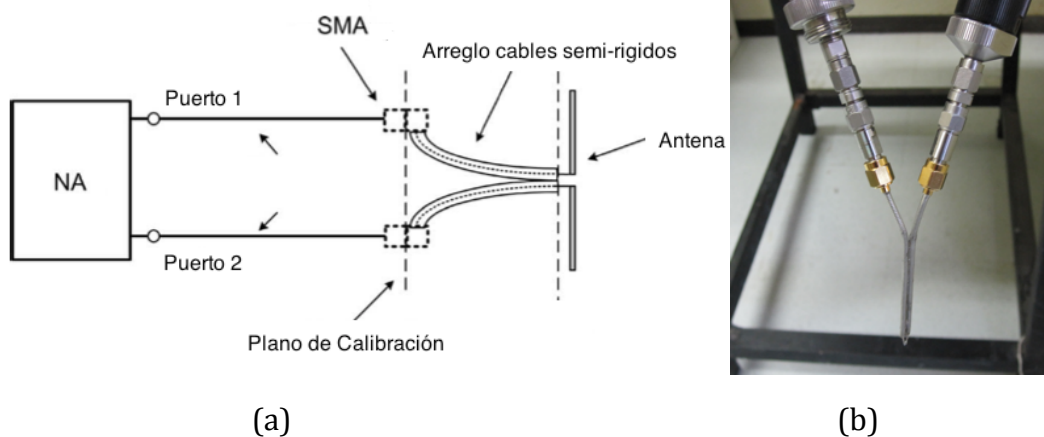


Figura. 4-3 Método de Calibración, (a) Diagrama de Calibración del Sistema , (b) Arreglo conectado al Analizador de Redes.

Una vez realizado estos pasos, el analizador de redes, compensa la mayoría de los factores que pueden afectar la medición.

4.2.2 Medición de la Impedancia.

Una vez que se asegura que no se tendrán efectos parásitos que puedan afectar la medición, se procede a conectar las antenas. Esto se hace soldando los extremos del arreglo, a las terminales de la antena. Este proceso se muestra en la figura 4-4.

Una vez conectada la antena se procede a obtener los parámetros S, proporcionados por el analizador. Para poder utilizar los valores del analizador, estos se guardan en formato real/imaginario.

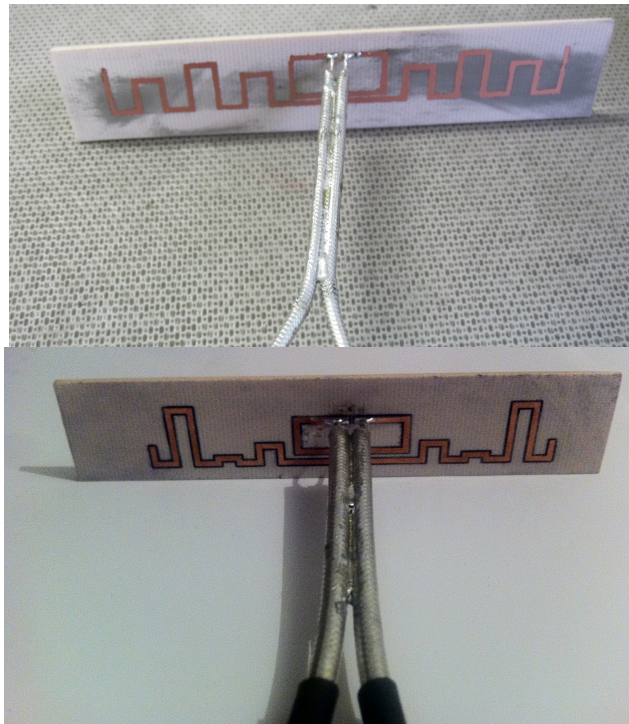


Figura. 4-4 Conexión de las Antenas al Arreglo

4.2.3 Análisis y Discusión de los Resultados.

De la figura 4-5 a la figura 4-8, se muestran los resultados, obtenidos al procesar los datos del analizador de redes PNA-X, en las cuales se muestran por separado, su parte resistiva y su parte reactiva.

En la figura 4-5 observamos que la reactancia y resistencia más cercanas a los valores obtenidos en la simulación a 915 MHz se encuentran a los 930 MHz, esto indica un corrimiento de 15 MHz, que puede considerarse aceptable, tomando en cuenta que las mediciones se hacen en un ambiente no controlado (fuera de la cámara anecoica) lo que puede afectar la medición, ya que es susceptible a las interferencias en el ambiente, tanto por la presencia de la persona al realizar las mediciones, como las señales existentes en el entorno.

Otro elemento que puede afectar es el proceso de construcción, que aunque se cuenta con un equipo de fabricación con una precisión de 0.1mm, la resolución también esta dada por el tamaño de la herramienta de frezado, un punto importante en el diseño de la antena 1, ya que la separación existente entre el loop y el reflector es de 0.4mm, y la freza utilizada es de 1/64 de pulgada que equivale a 0.406 mm, considerando que la freza sea ideal y el cortador esté en buenas condiciones.

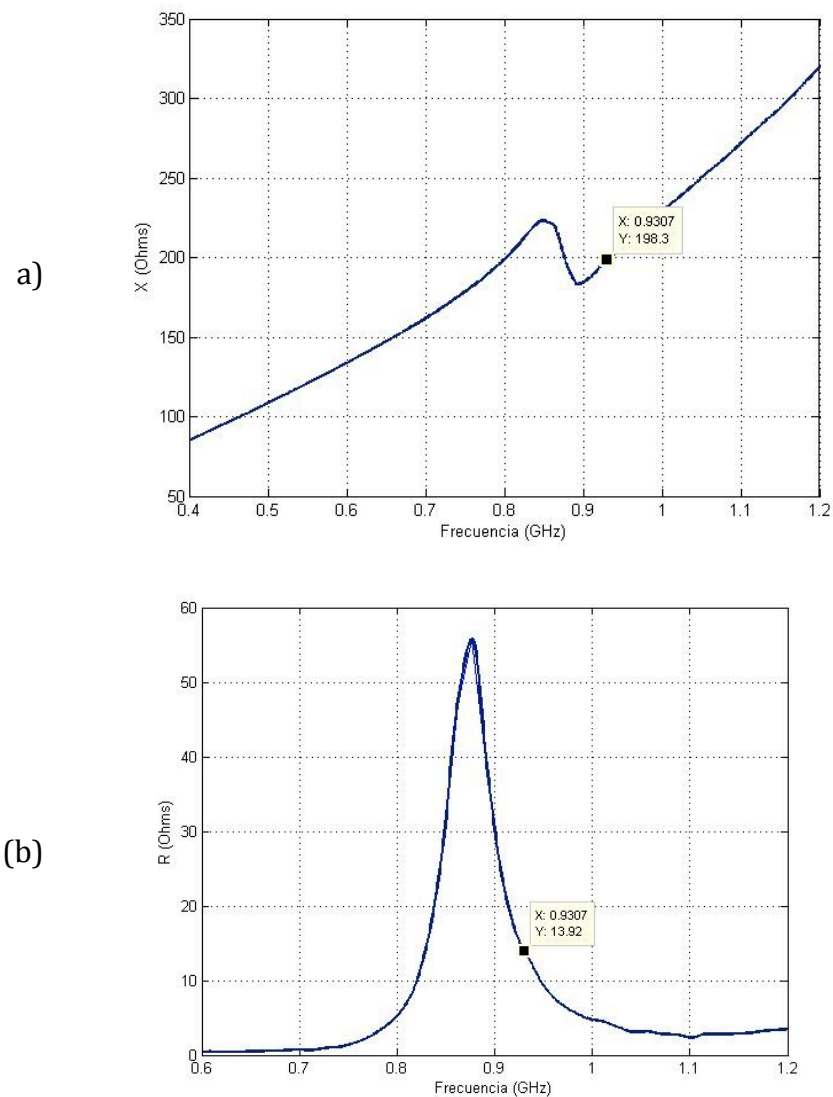


Figura. 4-5 Impedancia Medida de la Antena 1, (a) Reactancia y (b).Resistencia

El mismo caso ocurre en los resultados de la antena 2, que se muestran en la figura 4-6, aquí la resistencia y la reactancia, que se aproximan a los datos de simulación, se presentan en una frecuencia mas baja. Aunque siguen siendo resultados aceptables, ya que los valores obtenidos a la frecuencia deseada presentan un VSWR propicio para la aplicación en cuestión ($VSWR < 2$)

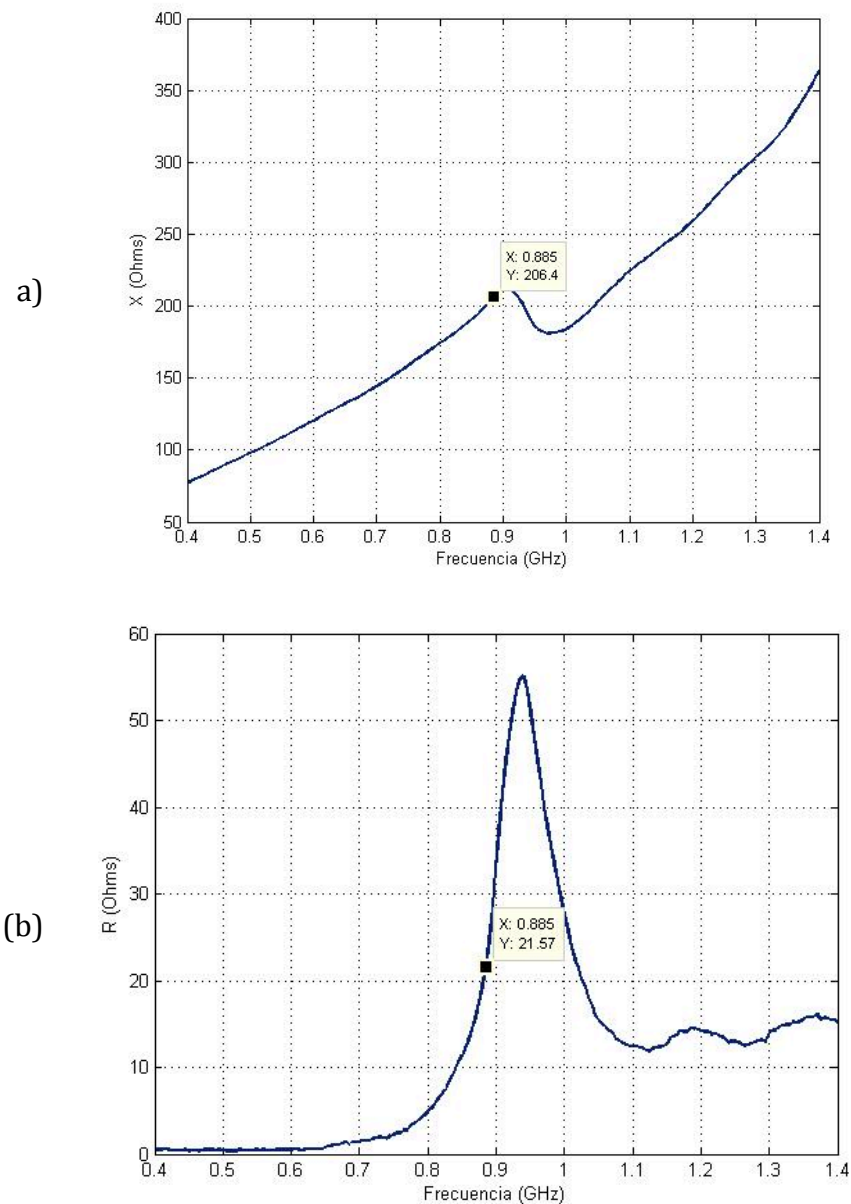


Figura. 4-6 Impedancia Medida de la Antena 2, (a) Reactancia y (b).Resistencia.

La antena 3, fue la que mas se alejo de los valores de simulación (Figura 4-7), presentando una diferencia de 100 MHz, lo que nos indica que se tienen que hacer correcciones en el diseño o hacer pruebas con métodos de construcción más precisos.

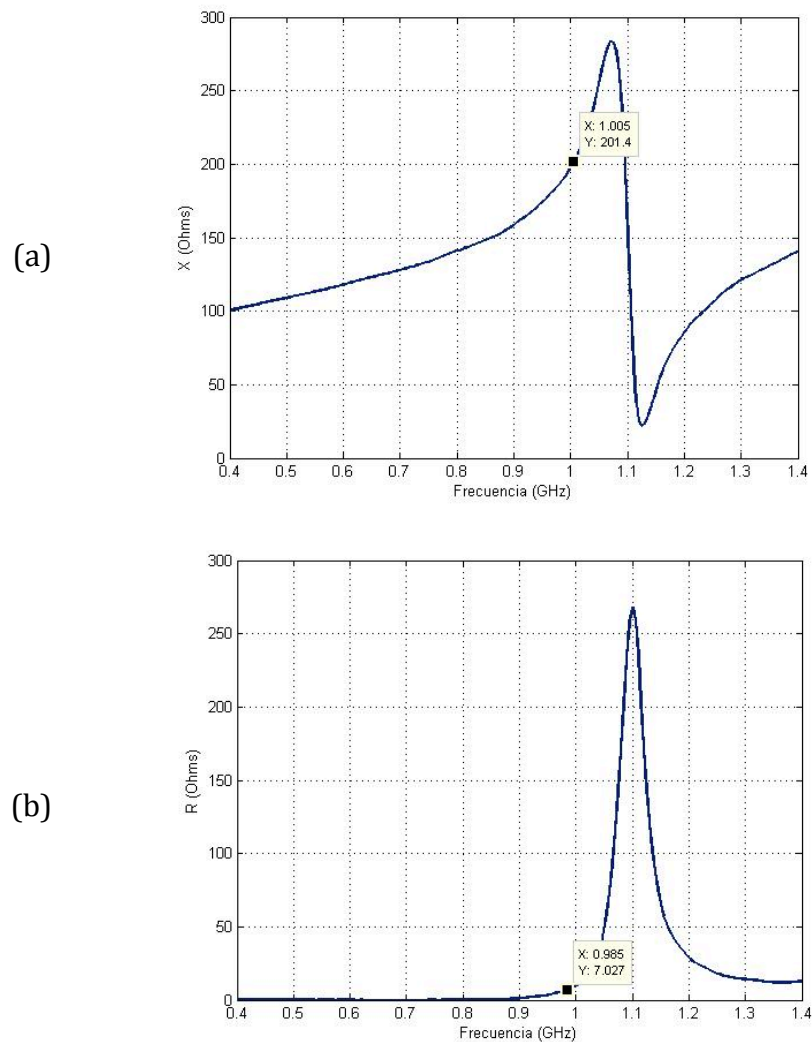


Figura. 4-7 Impedancia Medida de la Antena 3, (a) Reactancia y (b).Resistencia.

De las mediciones realizadas, la que se acercó más a los valores obtenidos por simulación, fueron las de la antena 4, mostradas en la figura 4-8, en donde existe una cercanía de aproximadamente 4 MHz en la parte reactiva y unos 5 MHz en la resistiva, entre lo medido y lo simulado. Por lo que de las 4 antenas, la antena generada por el GA, consigue no sólo el mejor resultado en simulación, sino también en su caracterización. Por lo que se plantea caracterizar los otros parámetros de esta antena.

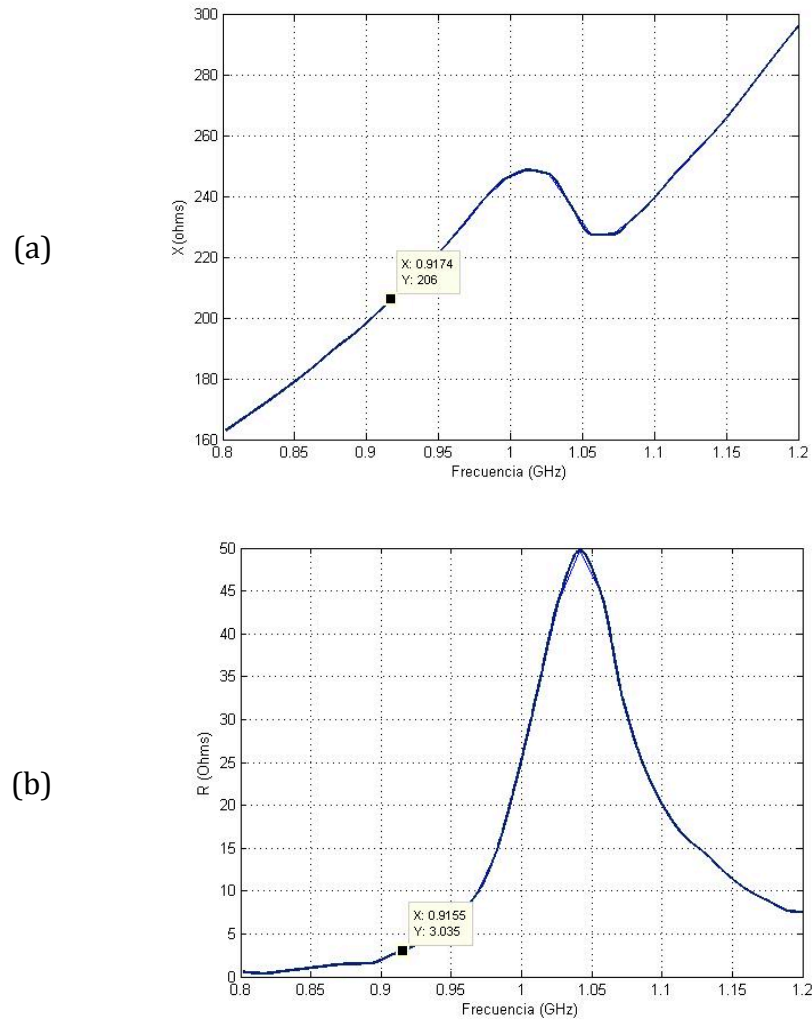


Figura. 4-8 Impedancia Medida de la Antena 4, (a) Reactancia y (b).Resistencia.

4.3 Medición del Patrón de Radiación y Ganancia.

Una vez que se ha medido la impedancia de las antenas, se procede a medir el patrón de radiación y la ganancia de la antena 4, la cual obtuvo los mejores resultados tanto en simulación como en medición.

Para medir la antena, se requiere un acoplamiento entre ella y el equipo de medición, por lo que de las alternativas estudiadas, se plantea el uso de un stub en serie, el cual se calcula para acoplar los $6.45+j206 \Omega$. Por medio del procedimiento básico utilizando una carta de Smith se llega al stub de la figura 4-9.

Las dimensiones calculadas para el stub de la figura 4-9, dan una separación entre la antena y el stub de 5.6 mm y un largo de 33.4 mm. El stub se forma por líneas separadas a una distancia de 1.8mm con un ancho de 2.8 mm. Esta separación y el ancho de las pistas se da para obtener una impedancia característica de 50Ω , lo que también es un parámetro que requiere el diseño del stub.

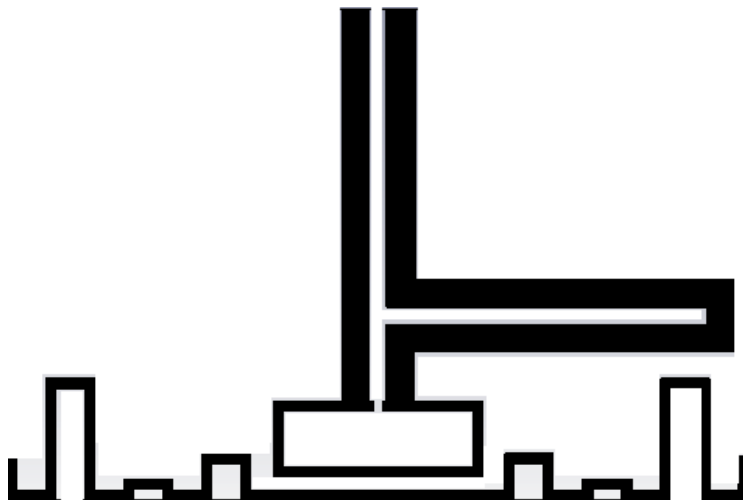


Figura. 4-9 Antena con Stub Calculado para acoplar 50Ω con $6.45+j206 \Omega$

Una vez obtenida las dimensiones, se procede a fabricar la antena con el stub, sobre una placa de FR4 (figura 4-10).

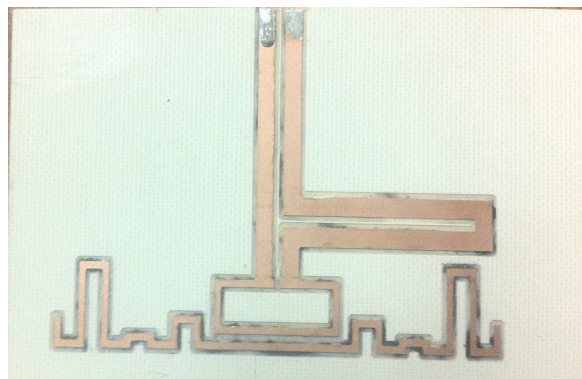


Figura. 4-10 Prototipo de Antena con Stub.

En la figura 4-11 se muestra la respuesta obtenida en el analizador de redes PNA-X, en donde observamos que existe un acoplamiento satisfactorio, aunque diferente al de la antena simulada. Esto debido a que se agregan los efectos del stub.

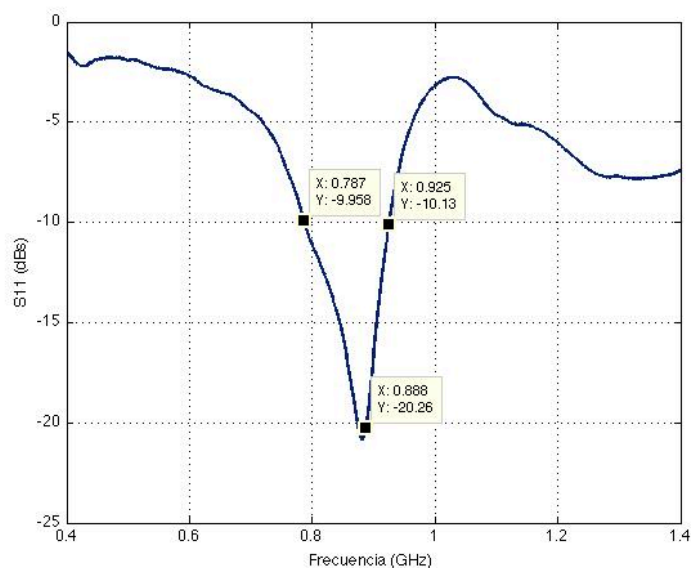
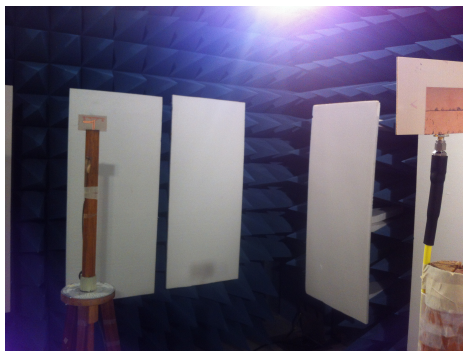


Figura. 4-11 Parámetro S_{11} de la Antena con el Stub.

En la figura 4-11 se muestra que existe un acoplamiento de los 787 MHz, a los 925 MHz, lo que permite hacer mediciones a los 915 MHz, que es el centro del intervalo de frecuencia marcado por la NOM-121. Una vez verificado el

funcionamiento del acoplador, se procede a la fabricación de una antena de iguales dimensiones. Esto con el fin de medir el patrón de radiación.

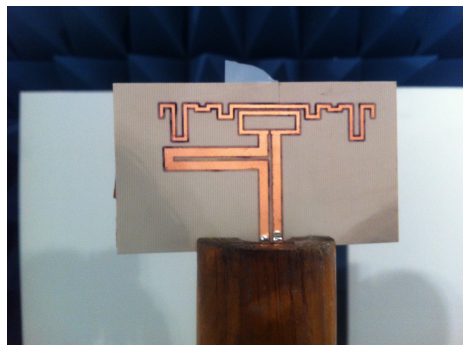
Para medir el patrón de radiación de la antena, se colocan dos antenas idénticas dentro de la cámara anecoica (Figura 4-12 (a) y (b)) a una distancia que al menos sobrepase una distancia de al menos $2D^2/\lambda$ (condición de campo lejano) [3], para la medición de estas antenas con una distancia de 1.5 m es suficiente para satisfacer la condición de campo lejano.



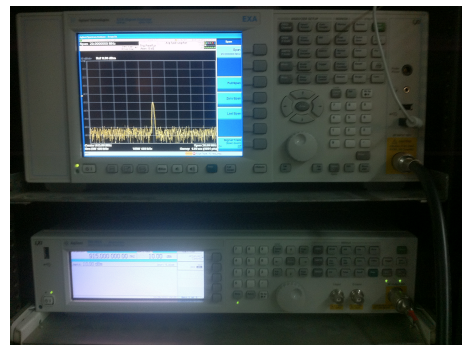
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura. 4-12 Medición del Patrón de Radiación y Ganancia. (a) y (b) Antenas Separadas por a 1.5 metros, (c) Antena colocada para girar, (d) Generador de Funciones y Radioreceptor

El siguiente paso, es conectar una de las antenas a un generador de funciones (figura 4-12 (c)), en este caso que opera a los 915 MHz, con una potencia de salida de

10 dBm. La segunda antena se conecta a un radiorreceptor al cual se ajusta a una frecuencia central de 915 MHz con un spam de 10 MHz (Figura 4-12 (d)).

Una vez alineadas las antenas, se gira una de ellas en azimut (ángulo de apertura), en este caso a cada 5 grados por movimiento, y se mide la potencia recibida en cada ángulo de giro, hasta dar una vuelta de 360°.

Al finalizar las mediciones, se normalizan los datos y se obtiene el patrón de radiación (figura 4-13), en la cual se observa que se comporta como una antena dipolo, teniendo dos nulos. El hecho de que la potencia se concentre del lado izquierdo, puede deberse a la posición del stub y del plano de reflector que este tiene detrás.

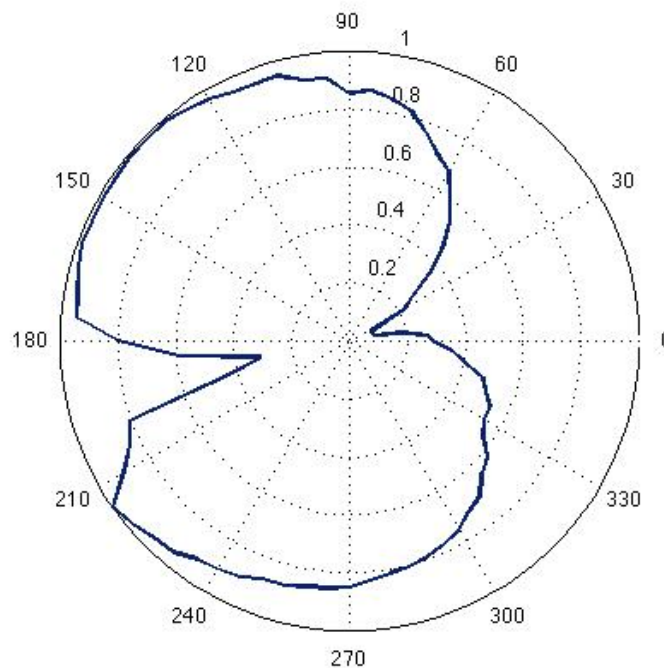


Figura. 4-13 Patrón de Radiación Normalizado.

De las mediciones realizadas, para obtener la ganancia, se requiere de la P_T (Potencia transmitida) y de P_R (potencia recibida). Y por medio de (4.1) obtenemos el valor:

$$G = \frac{4 * \pi * D}{\lambda} * \sqrt{\frac{P_R}{P_T}} \quad (4.1)$$

Sustituyendo $P_T = 10dBm$ y $P_R = -45 dBm$ obtenemos una ganancia de 0.2 dB. Que es baja en comparación en la obtenida en el simulador de 1, esto puede deberse a diversos factores, el primero de ellos, es que no tiene la misma resonancia, que en el caso de la simulación, se da a los 912 MHz, con el stub se presenta a los 888 MHz, lo que indica que el acoplamiento esta en esa frecuencia, pero esta frecuencia se encuentra fuera de nuestra área de interés (902-928MHz). También se deben considerar las perdidas por conductor generadas en el stub.

4.4 Conclusiones.

En este capítulo, se utiliza la técnica de medición diferencial, para obtener la impedancia de las antenas, se hicieron mediciones de las cuatro antenas propuestas en el capítulo 3, obteniendo resultados satisfactorios. En el caso de las antenas 1, 2 y 4, se obtienen impedancias cercanas a las de simulación, con lo cual se cumplen satisfactoriamente los requerimientos establecidos en el capítulo 3. En el caso de la antena 3, se presento una diferencia considerable, provocada posiblemente por un defecto de fabricación o en el propio diseño.

De las tres antenas que obtuvieron los mejores resultados, la que se acerco mas a los valores requeridos, fue la antena 4, por lo que se optó por medir sus otros parámetros (patrón de radiación y ganancia). Al medirlos se encontraron diferencias con respecto a la simulación, aunque nos permite establecer que se comporta como una antena de tipo dipolo. En cuanto a la ganancia, existen factores que la pueden

modificar, como el que la antena tenga ligeros desacoplamientos en comparación con los simulados y las pérdidas generadas por el stub.

Referencias

- [1] Xianming Qing, Chean Khan Gah, Zhi Ning Chen, "Measurement of UHF RFID Tag Antenna Impedance." *IEEE Antenna Technology*, 2009
- [2] "Agilent Technologies N5244/45AS Option H85 User Manual", *Agilent Technologies, Inc.* 2009
- [3] Cosntantine A. Balanis, "Antenna Theory Analysis and Design", *Wiley*, Tercera Edicion, 2005.

Conclusiones Generales.

El diseño de antenas para etiquetas pasivas de la tecnología RFID, presenta diferentes desafíos, entre los principales son la ganancia, ancho de banda y de acoplamiento para obtener una máxima transferencia de energía, estos, desde luego son para una frecuencia determinada. En este trabajo estos son los retos que se describen, los cuales se alcanzaron en lo general y en lo particular para cuatro antenas que se diseñaron. El diseño de estas antenas se realizó bajo la técnica de serpenteado, que se analizó para cumplir las condiciones de los parámetros mencionados, específicamente para cubrir el intervalo de frecuencia de 902-928 MHz que marca la norma mexicana NOM-121. Como característica importante del trabajo, fue tener un acoplamiento de impedancia de acuerdo a los diferentes circuitos integrados comerciales, ya que cada uno de ellos presenta diferentes impedancias de entrada, por lo que se analizaron diferentes técnicas de acoplamiento.

Una de las cosas importantes que se realizó en este trabajo de investigación, fue proponer un proceso de diseño, el cual se puede describir en cuatro pasos: Primero se inicia con la selección de los requerimientos de las antenas, donde consideramos el campo de lectura que se desea alcanzar, las dimensiones máximas de las antenas, así como su acoplamiento con el circuito integrado. Posteriormente se realizó el proceso de entonación de cada antena por medio de programas de simulación electromagnética (CST Studio 2009, HFSS v12). Una vez que se obtienen parámetros aceptables, se procede a la optimización de las antenas por medio de un programa basado en algoritmos genéticos realizado en Matlab el cual se enlaza al HFSS v12, a fin de mejorar el parámetro de acoplamiento. Por último se caracterizaron las antenas, proceso que utiliza la técnica de medición diferencial para obtener la impedancia de cada antena fabricada.

En el proceso de simulación y optimización, la antena 1 basada en un diseño convencional, obtuvo una ganancia de 1.85 dB y un coeficiente de transferencia de energía de 0.95, con lo que se alcanzó un campo de operación teórico de 18 m, lo que cumple con los requerimientos de diseño propuestos. Aunque cabe señalar que esta antena registró el menor ancho de banda de las cuatro antenas diseñadas. En el caso de la antena dos y tres (diseños que no han sido reportados en la literatura), se tiene una antena serpenteada con reducción en sus extremos (que permite, en algunos casos ampliar el ancho de banda) y una antena con el logotipo de México, éstas dos antenas alcanzaron una ganancia de aproximadamente 1, y un coeficiente de 0.86 y 0.76 respectivamente, que no llegó a cumplir con todos los requerimientos de diseño. Aunque en el caso de la antena 2 se aproximó más a cumplirlos. En el caso de la antena con el logotipo de México, se presentaron algunos problemas en su proceso de optimización debido a que se limitaron mucho las variaciones en la geometría para conservar la forma del texto, a pesar de ello, esta antena obtuvo un ancho de banda más amplio, lo que le permitiría (una vez terminado un proceso más amplio de optimización) operar en diferentes regiones del mundo cubriendo el intervalo de los 860-960 MHz que marcan las normas de la EPC. La antena cuatro, se generó directamente utilizando el programa de optimización, logrando una ganancia de 1 y el mejor acoplamiento de impedancias de las cuatro propuestas, registrando un coeficiente de transferencia de energía de 0.9996, esto debido a que se permitió una modificación más amplia de su geometría, ya que no se tenía una exigencia de mantener una forma predefinida.

En el proceso de medición de la impedancia, observamos como se obtienen los valores cercanos a los obtenidos por medio de simulación ($6.7+j206 \Omega$ en el intervalo de 902 y 930 MHz)). En este punto la antena que presentó los mejores resultados fue la antena cuatro, de la cual se midió su patrón de radiación y ganancia, aunque se presentaron diferencias con respecto a la simulación, estas se deben al método de acoplamiento y a las pérdidas generadas por el mismo, por lo que se debe trabajar en conseguir un método de acoplamiento que permita conectar la antena al equipo de medición sin alterar en gran medida sus parámetros.

En general las cuatro antenas presentan resultados satisfactorios, lo que permite considerar que el proceso de diseño propuesto, el método de optimización y la técnica de medición de impedancia, cumplen con su objetivo.

Trabajo Futuro.

- Someter a la antena 3 (logotipo México) a un proceso de optimización mas riguroso, a fin de ajustar su intervalo de operación dentro de las normas EPC.
- Diseñar la interfaz grafica del programa del Algoritmo Genético, que permita seleccionar los parámetros y archivos del simulador de forma sencilla.
- Conectar las antenas con los circuitos integrados de RFID para realizar las mediciones de campo de lectura entre otros parámetros.
- Fabricar las antenas sobre diferentes sustratos y corroborar la funcionalidad de estas en diferentes ambientes.

Bibliografía.

Libros.

K. Finkenzeller, "RFID Handbook". *Wiley & Son*, Nw York, 2000.

Jari-Pascal Curty, Michel Declercq, Catherine Dehollain, and Norbert Joehl, "Design and Optimization of Passive UHF RFID Systems". *Editorial Springer*, Lausanne, Switzerland, 2006.

V. Daniel Hunt, Albert Puglia, and Mike Puglia, "RFID a Guide to Radio Frequency Identification" *John Wiley & Sons*, New Jersey, 2007.

Cosntantine A. Balanis, "Antenna Theory Analysis and Design", *Wiley*, Tercera Edicion, 2005.

John L. Volakis, Chi-Chih Chen, Kyohei Fujimoto, "Small Antennas: Miniaturization Techniques & Applications", *McGraw-Hill*, 2010

Publicaciones.

Fernando Eliseo Solares Zavala, Roberto Linares y Miranda. "Técnicas y Parámetros de Diseño de Antenas de RFID", *Vigesimoprimera Reunión Internacional de Otoño de Comunicaciones, Computación, Electrónica y Exposición Industrial ROC&C 2010*. Diciembre de 2010.

Apéndice I.

Como Crear Funciones Para la Manipulación de HFSS con Matlab.

Para manipular el HFSS por medio del Matlab, se requiere de un archivo de VBS (Visual Basic Script).

Un ejemplo para la creación de un archivo de VBS, en matlab se muestra a continuación.

```
fid=fopen(['Ejemplo.vbs'], 'wt');
```

La función “fopen” permite la creación de cualquier tipo de archivo, en este caso la extensión sería “.vbs” y las propiedades “w,t” permiten la modificación de este archivo una vez creado. Cuando se tiene creado el archivo “vbs”, se puede agregar el código que permite el control de HFSS.

Las primeras líneas que se deben agregar al código, basados en el manual “Introduction to Scripting in HFSS”, son para la creación de las variables de control. En la tabla XIII se muestra un ejemplo de cómo se escribe el código de matlab que permite la generación del programa de VBS, este código genera las variables

Tabla XIII Código Utilizado en Matlab Para la
Generación del Código de VBS

Matlab	Visual Basic Script
<pre>fprintf(fid, 'Dim oHfssApp\n'); fprintf(fid, 'Dim oDesktop\n'); fprintf(fid, 'Dim oProject\n'); fprintf(fid, 'Dim oDesign\n'); fprintf(fid, 'Dim oEditor\n'); fprintf(fid, 'Dim oModule\n')</pre>	<pre>Dim oHfssApp Dim oDesktop Dim oProject Dim oDesign Dim oEditor Dim oModule</pre>

Las variables declaradas al inicio del código, nos van a permitir ejecutar las funciones que se requieran. Un ejemplo de una función creada para manipular HFSS por medio de Matlab, es la que permite crear un rectángulo. El código que muestra el manual para la creación de un rectángulo, es el siguiente:

```
Set oEditor = oDesign.SetActiveEditor("3D Modeler")
oEditor.CommandName <args>
CreateRectangle <RectangleParametersArray>, <AttributesArray>
<RectangleParametersArray>
Array("NAME:RectangleParameters",
"XStart:=", <value>,
"YStart:=", <value>,
"ZStart:=", <value>,
"Width:=", <value>,
"Height:=", <value>,
"WhichAxis:=", <string>)
```

Este código representa, lo que en HFSS seria la creación de un rectángulo, donde se seleccionan los valores de posición en los ejes “x”, “y” y “z”, el ancho, el nombre que se le será asignado, entre otros parámetros. En la primer línea vemos como para operar los comandos de creación de figuras, se tiene primero que llamar a

la variable “oEditor”, la cual nos coloca en las herramientas de creación y edición de objetos.

Una vez que conocemos el código necesario de VBS se crea la función de Matlab.

```
function hfssRectangle(fid, Name, Axis, Start, Width, Height, Units)
```

```
    Transparency = 0.5;
```

```
    fprintf(fid, '\n');
```

```
    fprintf(fid, 'oEditor.CreateRectangle _\n');
```

```
% Parámetros del Rectángulo:
```

```
    fprintf(fid, 'Array("NAME:RectangleParameters", _\n');
```

```
    fprintf(fid, "'IsCovered:=", true, _\n');
```

```
    fprintf(fid, "'XStart:=", "%f%s", _\n', Start(1), Units);
```

```
    fprintf(fid, "'YStart:=", "%f%s", _\n', Start(2), Units);
```

```
    fprintf(fid, "'ZStart:=", "%f%s", _\n', Start(3), Units);
```

```
    fprintf(fid, "'Width:=", "%f%s", _\n', Width, Units);
```

```
    fprintf(fid, "'Height:=", "%f%s", _\n', Height, Units);
```

```
    fprintf(fid, "'WhichAxis:=", "%s", _\n', upper(Axis));
```

```
% Atributos.
```

```
    fprintf(fid, 'Array("NAME:Attributes", _\n');
```

```
    fprintf(fid, "'Name:=", "%s", _\n', Name);
```

```
    fprintf(fid, "'Flags:=", "", _\n');
```

```
    fprintf(fid, "'Color:=", "(132 132 193)", _\n');
```

```
    fprintf(fid, "'Transparency:=", %d, _\n', Transparency);
```

```
    fprintf(fid, "'PartCoordinateSystem:=", "Global", _\n');
```

```
    fprintf(fid, "'MaterialName:=", "vacuum", _\n');
```

```
    fprintf(fid, "'SolveInside:=", true)\n');
```

En esta función, se agregan otros elementos, como es el color, la transparencia, etc. Los nombres de cada parámetro se deben mantener en inglés y con el mismo formato que marca en el manual, para evitar los errores.

De este modo se crean las funciones, agregándole los elementos que uno desee, ya sea dejando abierta la función para asignar valores o hacer una función cerrada donde, al invocarse genere una forma con dimensiones ya definidas.

Apéndice II

Configuración del Programa del Algoritmo Genético.

Para realizar la optimización de una antena en el programa propuesto, existen dos métodos, uno es crear la antena por medio de las funciones generadas en Matlab o por medio de la manipulación de un archivo existente. A continuación se muestra como seleccionar el método y en general las funciones mas importantes del programa del algoritmo genético.

Al inicio se seleccionan los parámetros del GA, mostrados en el tema 3.3, en donde se considera, el numero de individuos, generaciones, mutación, así como las variables y la resolución con la cual se hará la búsqueda. Una vez que se determinan todos estos parámetros se determina la impedancia que deseamos alcanzar:

CIR=6.7; %Impedancia Resistiva
CII=206; %Impedancia Reactiva

Ya con todos los datos que requerimos, el programa se sitúa en la función de la “función objetivo”, de la cual tomamos las partes mas importantes:

function fo = FOS11(pob);	
As1=pob(rm,1);	% Asignando el valor aleatorio a la variable 1.
As2=pob(rm,2);	% Asignando el valor aleatorio a la variable 2.
if método=1;	
Simu=S11HFSS;	%Construcción de Antena por Código
else	


```

Simu=S11HFSS2;          % Manipulación de Archivo Existente
end;
Z11=((1 + simu(:,2))./(1-simu(:,2))).* 50; %Calculo de la Impedancia a Partir
                                         % del S11
FoR=CZ11(freq,Z11,CIR,CII);           %Búsqueda de los valores deseados.
fo=[fo;FoR];                          % Almacena la FO obtenida de cada
                                         %individuo

```

En el caso de las antenas creadas por medio del código generado en matlab, se tiene la función S11HFSS, la cual se resumen a continuación y en el cual se da el ejemplo de cómo se construye la antena:

```

%Parámetros de Simulación.
fC = 915e6;      %Frecuencia central
Wv = 3e8/fC;     %Longitud de Onda
L = Wv/2;       %Media longitud de Onda
fB = 700e6;     %Frecuencia Inicial
fA = 1100e6;    %Frecuencia Final
nMuestra = 201; %Numero de Muestras
% Condiciones de condiciones de Frontera.
AireX = Wv/2.5;
AireY = Wv/2.5;
AireZ = Wv/2.5;

%Ubicacion del HFSS en el disco duro
hfssExePath = 'C:\"Archivos de Programa"\Ansoft\HFSS12\hfss.exe';
fid = fopen(['C:\P-AG\Construccion\TEMP\gen' num2str(cgn) 'dipole'
num2str(ind) '.vbs'], 'wt'); %Crea el archivo del VBS
fopen(['C:\P-AG\Construccion\TEMP\gen' num2str(cgn) 'tmpData' num2str(ind)
'.m'], 'wt'); %Crea el archivo a donde se exportaran los resultados

```

```

hfssNewProject(fid); %Crea un Nuevo Proyecto
hfssInsertDesign(fid, 'RFID_Loop_Reflector'); %Se crea un nuevo diseño.

% Generación de la Antena
%Construccion del Loop
hfssRectangle(fid, 'Loop1','Z', [ 0.5, 0.5+lp2+sep,0],lp1-2, 1, 'mm');
hfssRectangle(fid, 'Loop2','Z', [-0.5, 0.5+lp2+sep,0],-lp1+2, 1, 'mm');
hfssRectangle(fid, 'Loop3','Z', [ lp1-(gapL/2)-1,1.5+sep,0], 1,lp2, 'mm');
hfssRectangle(fid, 'Loop4','Z', [-lp1+(gapL/2)+1,1.5+sep,0],-1,lp2, 'mm');
hfssRectangle(fid, 'Loop5','Z', [ 0, 0.5+sep,0], lp1-0.5,aA, 'mm');
hfssRectangle(fid, 'Loop6','Z', [ 0, 0.5+sep,0],-lp1+0.5,aA, 'mm');

%Construccion del Reflector
hfssRectangle(fid, 'Refrec1','Z', [0, -1, 0], cr, aA, 'mm');
hfssRectangle(fid, 'Refrec2','Z', [0, -1, 0], -cr, aA, 'mm');

%Colocacion de Fuente
hfssRectangle(fid, 'GapSource', 'Z', [-0.5, 0.5+lp2+sep, 0], aA, gapL, 'mm');
hfssAssignLumpedPort(fid, 'LumpedPort', 'GapSource', [-0.5, 0.5+lp2+sep+0.5, 0],
[0.5,0.5+lp2+sep+0.5, 0], 'mm',50);

% Condiciones de Frontera
hfssBox(fid, 'AirBox', [-AireX-0.0185, -AireY, -AireZ]/2, [AireX+0.0185, AireY,
AireZ], 'meter');
hfssAssignRadiation(fid, 'ABC', 'AirBox');

%Parámetros de analisis
hfssInsertSolution(fid, 'Setup915MHz', fC/1e9,0.02,15);
hfssInterpolatingSweep(fid, 'Sweep700to1100MHz', 'Setup915MHz', fB/1e9,
fA/1e9, nMuestra);

```

```

%Guardar el Archivo para resolver
hfssSaveProject(fid, tmpPrjFile, true);
hfssSolveSetup(fid, 'Setup915MHz');

% Exportar datos del HFSS a matlab
hfssExportNetworkData2(fid, ['C:\Construccion2\gen' num2str(Ngen) 'tmpData'
num2str(ind) '.m'], 'Setup915MHz', 'Sweep700to1100MHz');

fclose(fid); % Finaliza archivo VBS

% Inicia simulación

disp('Simulacion con HFSS ..');
hfssExecuteScript(hfssExePath, ['C:\Construccion2\gen' num2str(Ngen) 'dipole'
num2str(ind) '.vbs']);
% Cargar los datos de simulacion.
run(['C:\Construccion2\gen' num2str(Ngen) 'tmpData' num2str(ind) '.m']);
simu=[f,S]; %Se guardan los resultados de simulación para su procesamiento

```

Como se aprecia en el código, se construye el archivo de VBS en varios bloques, entre los que se encuentra el de la creación de la antena, la fuente de la misma, las condiciones de frontera, así como los intervalos para el análisis y su posterior exportación. Este código ejemplo, construye una antena con acoplamiento inductivo, el cual es la base con la que se construyó la antena 4 de este trabajo de tesis.

Para el caso de utilizar un archivo existente, se tiene la función S11HFSS2 en la cual se mantiene la estructura general, pero se agregan funciones las cuales se muestran a continuación :

```

hfssOpenProject(fid, ['C:\Construccion\Mexico.hfss']); %Abre el archivo existente

```

```

hfssSetDesign(fid, 'HFSSDesign1');    %Dentro de la simulación es el nombre del
                                     proyecto

%Variación de los parámetros:
hfssVariableChange(fid, 'loop2', Lp2, 'mm') %Modifica las variables del diseño
hfssVariableChange(fid, 'loop1', Lp1, 'mm')
hfssVariableChange(fid, 'B', Bant, 'mm')
hfssVariableChange(fid, 'M', Mant, 'mm')

```

Al utilizar este método, se reduce la cantidad de código, por que no se construyen uno a uno los componentes de la estructura que conforma la antena, aunque hay que recordar que se deben de crear las variables dentro del simulador para que se puedan modificar.

Una vez que se obtienen los resultados y se hace el procesamiento para obtener la impedancia de la antena a partir del S_{11} , se tiene la función “CZ11”, en la cual se aplica (3.1) para obtener el valor de la función objetivo, el código se muestra a continuación:

```

function FoR=CZ11(freq,Z11,CIR,CII)
Rop=[];
Xop=[];
Z11real=real(Z11); %Resistencia de la Antena
Z11imag=imag(Z11); %Reactancia de la Antena
for i=200 :215    %Búsqueda de los 900 a los 915 MHz
    Rop=[Rop;abs((Z11real(i)-CIR)/CIR),i];
end
for i=200 :215
    Xop=[Xop;abs((Z11imag(i)-CII)/CII),i];
end
[MinRop,K]=min(Rop(:,1));

```

```

[MinXop,T]=min(Xop(:,1));
Freal=Rop(K,2);
Fimag=Xop(T,2);
Freal=freq(Freal)/100000000;
Fimag=freq(Fimag)/100000000;
If Freal<Fimag;
    freqop=abs(Freal-Fimag/Fimag);
else
    freqop=abs(Freal-Fimag/Freal);
end
FoR=MinRop+MinXop+freqop; %Ecuación de FO
return;

```

En esta función se hacen los cambios si se requiere de otra función objetivo o si se quiere buscar en otro intervalo de frecuencia.

Otros elementos importante que conforman el programa son las funciones de cruza, mutación, población y selección, las cuales no requieren ser modificadas por lo que solo se hace mención de ellas. Al final el resultado se mostrara cuando se interrumpa el programa ya sea por estancamiento (que no exista mejora después de un cierto numero de generaciones) o por que se logro llegar al objetivo planteado.

Para comodidad, al final del proceso se tiene la función:

```

mailme(cputime-tpi,fo(1),cgn);

```

La cual nos envía un correo con la información de la función objetivo obtenida, el tiempo que tardo en finalizar y las generaciones que se requirieron. Como trabajo futuro se plantea la posibilidad de enviar una gráfica con la evolución que se registro en el proceso de optimización.