



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY®**

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Campus Ciudad de México
División de Ingeniería y Arquitectura

Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones
Departamento de Mecatrónica

DISEÑO E IMPLEMENTACION DE ANTENAS UHF PARA LECTORES RFID

Autores: Gabriela Pérez Arredondo
Mauricio Barra Rincón
Julio Paulino Bracho Gómez
Nahum Hernández Castañón



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY®**

Asesores: Dr. Raúl Crespo Saucedo

Profesor: Dr. Jorge Eduardo Brieva Rico

BIBLIOTECA
Campus Ciudad de México

México D.F. Noviembre de 2006

ÍNDICE

	Página
1 Introducción	4
2 Objetivos	5
2.1 Objetivo General	5
2.2 Objetivos Específicos	5
3 Problemática	5
4 Estados del Arte	7
4.1 ¿Qué es RFID?	7
4.1.1 Comunicación inalámbrica y la interfaz gráfica	8
4.1.2 Frecuencias portadoras	9
4.1.3 Tasa de transferencia de información y el ancho de banda	10
4.1.4 Rango y niveles de potencia	11
4.1.5 Componentes de un sistema RFID	12
4.1.5.1 Características básicas de un transponder RFID	12
4.1.5.1.1 Energización de las etiquetas	13
4.1.5.1.2 Opciones de transporte de datos	13
4.1.5.2 El lector /interrogador	14
4.1.5.3 Programadores de transponders	14
4.1.6 Categorías de los sistemas RFID	15
4.1.7 Áreas de aplicación para RFID	15
4.2 Historia y situación actual de la tecnología	16
4.3 Compañías que utilizan RFID actualmente	17
4.4 Estandarización para RFID	18
4.5 Situación en México	18
4.6 Riesgos a la salud	19
4.6.1 Límites de los niveles de Campos eléctricos y magnéticos	19
4.6.2 Estándares Actuales	20
4.6.2.1 Normas Oficiales Mexicanas	21
4.7 Mercury4 de Thing Magic	21
4.7.1 Operación del Mercury 4	22
5 Desarrollo	26
5.1 Metodología	26
5.2 Software de simulación	27
5.3 Antenas	28
5.3.1 Consideraciones generales para las antenas	31
5.3.2 Parámetros de antenas en transmisión	32
5.3.2.1 Impedancia	33
5.3.2.2 Patrón de radiación	33
5.3.2.3 Directividad	34
5.3.2.4 Polarización	35
5.3.2.5 Ancho de banda	35
5.3.2.6 Campo cercano y campo lejano	36
5.3.2.7 EIRP	36
5.3.3 Parámetros de antenas en recepción	36
5.3.3.1 Adaptación	37
5.3.3.2 Área y longitud efectiva	37
5.3.4 Temperatura de ruido de la antena	37

5.3.5 Acoplamiento de impedancias	38
5.3.5.1 Línea de transmisión concéntrica o coaxial	38
5.3.5.2 Ondas incidentes y reflejadas	38
5.3.5.3 Líneas de transmisión resonantes y no resonantes	38
5.3.5.4 Coeficiente de reflexión	39
5.3.5.5 Ondas estacionarias	39
5.3.5.6 Relación de onda estacionaria	39
5.3.5.7 Acoplamiento de impedancias en la línea de transmisión	40
5.3.5.7.1 Adaptación con transformador de un cuarto de longitud de onda	40
5.3.5.7.2 Adaptación con línea de acoplamiento	41
5.3.5.7.3 Línea de acoplamiento usando el diagrama de Smith	41
5.3.5.7.4 Impedancia de entrada y la gráfica de Smith	42
5.3.5.8 Acoplamiento de impedancias por antena panel	42
5.4 Funcionamiento de antenas UHF	43
5.4.1 Dipolo de media onda	44
5.4.2 Antena de lazo	45
5.4.3 Antena de panel microstrip	46
5.4.3.1 Introducción	46
5.4.3.2 Ventajas y desventajas	47
5.4.3.3 Técnicas de alimentación	49
5.4.3.4 Polarización circular	52
5.4.3.5 Selección del sustrato (material dieléctrico)	54
5.4.4. Antenas microstrip en diferentes configuraciones geométricas	55
5.4.4.1 Antenas microstrip rectangulares	55
5.4.4.2 Antenas microstrip circulares	59
5.4.4.3 Antenas microstrip semicirculares	61
5.4.4.4 Antena microstrip triangular equilátera	62
5.4.4.5 Antena microstrip triangular 30°-60°-90°	64
5.4.4.6 Antena microstrip de anillo anular	64
5.4.4.7 Comparación de las configuraciones de banda ancha	65
5.4.5. Antenas microstrip de banda ancha y polarización circular	66
5.4.5.1 Antenas microstrip de polarización circular con doble alimentación	66
5.4.5.2 Antenas microstrip de polarización circular con alimentación sencilla	67
5.4.5.3 Antena de alimentación diagonal casi cuadrada	69
5.4.5.4 Antena cuadrada con bordes modificados	69
5.4.5.5 Antena cuadrada con esquinas modificadas	70
5.4.5.6 Antena cuadrada con corte interno diagonal	70
5.5 Equipo medidor de SWR	71
6 Resultados	72
6.1. Diseño de antena panel microstrip	72
6.1.1 Especificaciones de diseño	72
6.1.2 Procedimiento de diseño	72
6.1.2.1 Diseño 1	72
6.1.2.2 Diseño 2	74

6.1.2.3 Diseño 3	75
6.2 Implementación	78
6.2.1 Equipo y material utilizado	78
6.2.2 Diferentes diseños de antenas	78
6.2.3 Procedimiento de Implementación	79
6.2.4 Antena de cobre sin dieléctrico	80
6.2.4.1 Patrón de radiación horizontal con polarización vertical	80
6.2.4.2 Patrón de radiación vertical con polarización vertical	82
6.2.4.3 Patrón de radiación horizontal con polarización horizontal	84
6.2.4.4 Patrón de radiación vertical con polarización horizontal	86
6.2.5 Antena de aluminio sin dieléctrico	87
6.2.5.1 Patrón de radiación horizontal con polarización vertical	87
6.2.5.2 Patrón de radiación vertical con polarización vertical	90
6.2.5.3 Patrón de radiación horizontal con polarización horizontal	92
6.2.5.4 Patrón de radiación vertical con polarización horizontal	93
6.2.6 Antena de acero sin dieléctrico	95
6.2.6.1 Patrón de radiación horizontal con polarización horizontal	95
6.2.6.2 Patrón de radiación vertical con polarización horizontal	97
6.2.6.3 Patrón de radiación horizontal con polarización vertical	99
6.2.6.4 Patrón de radiación vertical con polarización vertical	100
6.2.7 Antena de cobre con dieléctrico	102
6.2.7.1 Patrón de radiación horizontal con polarización vertical	102
6.2.7.2 Patrón de radiación vertical con polarización vertical	104
6.2.7.3 Patrón de radiación horizontal con polarización horizontal	106
6.2.7.4 Patrón de radiación vertical con polarización horizontal	107
6.2.8 Antena de aluminio con polarización lineal	108
6.2.8.1 Patrón de radiación horizontal con polarización horizontal	109
6.2.8.2 Patrón de radiación horizontal con polarización vertical	111
6.2.8.3 Patrón de radiación vertical con polarización vertical	112
6.3 Interpretación de resultados	113
7 Conclusiones	114
8 Trabajo Futuro	115
9 Referencias Bibliográficas	116
10 Póster.	117
Anexo 1. Software de simulación	118
1 Ansoft Corporation	118
2 Poynting Group	119
3 Flometrics	121
4 Computer Simulation Technology	123
5 FEKO	124
Anexo 2. Equipo medidor de SWR	126
1 Agilent	126
2. Diamond Antenna	126
3 Array Solutions	128
4 PROCOM Antenas	129
5 Ameritron	130

1 INTRODUCCIÓN

Con la realización de este proyecto pretendemos diseñar e implementar antenas para la banda UHF de los 915 MHz, que es la utilizada en nuestro país y en Europa. La tecnología RFID en México no ha sido desarrollada a todo su potencial pues su costo es elevado. En países como Estados Unidos y algunos europeos ha habido aplicaciones importantes, pues se cuenta con más infraestructura, además de un soporte técnico y de desarrollo.

Nuestra prioridad fue el diseño de la antena pues, estos son dispositivos de un costo elevado, pero de gran utilización. Se necesitan varias antenas para tener un sistema robusto con aplicación suficiente, sin embargo, el precio de las mismas no es accesible para cualquier tipo de empresa.

En este trabajo empezaremos definiendo los objetivos de nuestro proyecto, para después enfocarnos en los problemas que enfrenta la tecnología RFID (Radio Frequency Identification) en nuestro país. Seguiremos explicando el funcionamiento de dicha tecnología, así como cada uno de los componentes que la comprenden como lo es el lector, antenas y etiquetas.

Como este proyecto se centra en el diseño de antenas para esta tecnología más que en la tecnología por sí misma, describiremos también los fundamentos básicos de las mismas, así como los principios de diseño de antenas especiales para esta tecnología en la banda de frecuencia específica.

Por último describiremos cada uno de nuestros diseños y sus características particulares que los hacen factibles para implementación con RFID.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Diseñar e implementar antenas UHF comerciales para leer etiquetas RFID. La antena UHF se diseñará e implementará para la banda de los 915 MHz.

2.2 Objetivos específicos

- Investigar la teoría necesaria en cuanto al estado del arte de la tecnología RFID en general, tanto en nuestro país como en el extranjero.
- Conocer a fondo el funcionamiento y conceptos físicos para comenzar a estudiar el diseño de antenas para las frecuencias requeridas.
- Investigar la teoría necesaria para diseñar antenas UHF
- Proponer algunos diseños de una antena UHF para trabajar entre 900 – 928 MHz que cumpla con las especificaciones de este tipo de antenas. Elegir el más óptimo para su implementación.
- Generar un conjunto de pruebas para validar sus diseños e implementaciones.
- Probar la operación de las antenas con el equipo de RFID Mercury4 de la empresa ThingMagic.
- Comprobar que nuestro diseño es funcional y mucho más barato que los que existen actualmente en el mercado.

3 PROBLEMÁTICA

Identificación por radio frecuencia, o RFID, es un término genérico para tecnologías que usan ondas de radio para identificar automáticamente a personas u objetos. Existen muchos métodos de identificación, pero el más común es guardar un número de serie que identifique una persona o un objeto, y tal vez otra información, en un microchip que está unido a una antena (juntos se les conoce como etiqueta RFID). La antena le permite al chip transmitir información a un lector RFID. El lector convierte las ondas de radio en información digital que pueda ser procesada por un sistema de cómputo.

RFID es una tecnología probada que ha estado disponible desde la década de los setenta. Hasta ahora, ha sido demasiado cara y muy limitada su aplicación comercial. Pero si las etiquetas pueden ser fabricadas lo más barato posible, pueden resolver muchos problemas asociados con los códigos de barras. Las ondas de radio viajan a través de la mayoría de los materiales no metálicos, por lo que pueden implantarse en paquetes o en plástico de protección para ser a prueba de agua y tener mayor durabilidad. Estas etiquetas (tags) contienen microchips que son capaces de almacenar un número serial único para cada producto manufacturado alrededor del mundo.

Muchas compañías han invertido en RFID para obtener las ventajas que ofrece. Estas inversiones se han hecho usualmente en sistemas de lazo cerrado, esto significa que una compañía rastrea bienes que nunca dejan de controlar. Esto se debe a que los sistemas RFID existentes usan tecnología propietaria, es decir que si una Compañía A

pone una etiqueta en un producto, no podrá ser leída por una Compañía B a menos que usen un sistema RFID del mismo fabricante.

Otra razón es el precio. Para que estos sistemas sean efectivos en cuanto a costos necesitan que existan etiquetas baratas de las cuales puedan prescindir las compañías en caso de tener mover algún producto en una cadena abierta de suministros.

Un sistema RFID consiste de una etiqueta formada por un microchip y una antena, y un interrogador o lector con una antena. El lector envía ondas electromagnéticas, la antena de la etiqueta está sintonizada para recibir estas señales. Una etiqueta RFID pasiva recibe potencia del campo creado por el lector y utiliza esta potencia para alimentar el circuito del microchip. El chip después modula las ondas que la etiqueta manda de nuevo al lector; este último convierte estas nuevas ondas en información digital.

Las etiquetas y los lectores deben estar sintonizados a la misma frecuencia para poderse comunicar. Los sistemas RFID usan muchas frecuencias diferentes, pero generalmente las más comunes son las frecuencias bajas, que están alrededor de los 125 KHz; la alta frecuencia (13.56 MHz), la ultra-alta frecuencia o UHF (860 – 960 MHz). Las microondas (2.45 GHz) también son utilizadas en algunas aplicaciones. Las ondas de radio se comportan de manera diferente a diferentes frecuencias, por lo que es importante escoger la frecuencia adecuada dependiendo de la aplicación.

La mayoría de los países ha asignado el área de los 125 kHz o 134 kHz del espectro de radiofrecuencia para sistemas de baja frecuencia, y 13.56 MHz es usado para sistemas de alta frecuencia. Pero sistemas UHF de RFID han existido apenas desde mediados de los 90, y los países aún no han acordado en una sola área del espectro para estas aplicaciones. Europa usa 868 MHz para UHF, mientras que EUA usa 915 MHz. Hasta ahora Japón no había aceptado el uso del espectro UHF para RFID, pero parece ser que están próximos a liberar los 960 MHz.

Algunos grupos como la Global Commerce Initiative están tratando de alentar a los países para acordar el uso de frecuencias. Fabricantes de etiquetas y lectores también está tratando de desarrollar sistemas que puedan trabajar a más de una frecuencia y así solucionar este problema.

Existen dos tipos diferentes de lectores. Aunque los términos utilizados no son muy precisos en su descripción, generalmente se usa “lector inteligente” para referirse al que tiene la habilidad no sólo de correr en diferentes protocolos, pero también para filtrar información y para correr distintas aplicaciones. Esencialmente, se trata de una computadora que se comunica con las etiquetas. Un lector “tonto”, por el otro lado, es un dispositivo simple que sólo es capaz de leer un tipo de etiqueta usando una frecuencia y un protocolo. Este último tipo tiene poco poder de cómputo, por lo que no puede filtrar las lecturas ni almacenar los datos de las etiquetas.

El costo de un sistema funcional completo RFID depende de la aplicación, el tamaño de la instalación, el tipo de sistema y otros factores, así que es difícil establecer un costo genérico. Además de las etiquetas y lectores, las compañías necesitan comprar middleware para filtrar los datos RFID. Podrían necesitar contratar un integrador de sistemas y actualizar algunos procesos como los del manejo de bodegas. Y desde luego

necesitarían instalar lo necesario para conectar lectores a la red eléctrica y a la red corporativa.

De lo anterior podemos darnos cuenta de que la tecnología RFID parece ser la solución a varias aplicaciones, que hasta la fecha no habían podido ser atendidas por el costo. La implementación de tecnología RFID es costosa en general, pero más para un país como el nuestro en el que no se cuenta con diseños propios y la tecnología debe ser importada.

En este proyecto no se busca en sí una innovación tecnológica, sino la adaptación de la tecnología y el aprovechamiento de la misma con un costo menor. Buscamos la fabricación de antenas lectoras a un menor precio, ya que esto significaría la más rápida adopción de la tecnología en empresas que no cuenten con capital masivo.

4 ESTADO DEL ARTE

Preámbulo

RFID, su aplicación, estandarización, e innovación cambian constantemente. Su adopción es relativamente nueva y por tanto hay muchas características de la tecnología que no se entienden bien por el público en general. Desarrollos de la tecnología RFID proporcionan capacidades de memoria más grandes, rangos de lectura más amplios y procesamiento más rápido. Es poco probable que la tecnología reemplace por completo a los códigos de barras – incluso con la inevitable reducción de costos de las materias primas junto con las economías de escala, el circuito integrado de la etiqueta de radio frecuencia nunca será tan barato como la etiqueta del código de barras. Sin embargo, RFID continúa creciendo en sus nichos establecidos, donde los códigos de barras y otras tecnologías ópticas no son efectivos. Si se logra integración de algunos estándares, donde los equipos RFID de diferentes fabricantes se puedan utilizar intercambiamente, el mercado crecerá de manera exponencial.

Si se piensa en transmisiones de radio o en los teléfonos móviles, se puede apreciar los beneficios de la comunicación inalámbrica. Si se extienden estos beneficios a la comunicación de datos, para y desde carriers de datos portátiles de bajo costo, entonces estaremos cerca de apreciar la naturaleza y potencial de la identificación por radio frecuencia (RFID). RFID es un área de identificación automática que poco a poco ha ido tomando auge y que ahora se ha visto como el medio radical para implementar procesos de manejo de información de manera complementaria con otras tecnologías de captura de información como los códigos de barras. Un rango de dispositivos y sistemas asociados están disponibles para satisfacer una amplia gama de aplicaciones. A pesar de esta diversidad, los principios en los que se basan son muy directos, no obstante la tecnología y los tecnicismos con los que operan pueden ser bastante sofisticados.

4.1 ¿Qué es RFID?

El objetivo de cualquier sistema RFID es transportar información en transponders adecuados, generalmente conocidos como etiquetas, y extraer la información, por medio de lectores, en un tiempo y lugar adecuados para satisfacer una necesidad en particular. La información en una etiqueta puede proporcionar

información de un artículo en fabricación, bienes en tránsito, una ubicación, la identificación de un vehículo, un animal o un individuo. Incluyendo información adicional al prospecto se le provee para aplicaciones de soporte a través de información específica del artículo o instrucciones disponibles inmediatamente en la lectura de la etiqueta.

El sistema requiere, además de las etiquetas, un medio de lectura o interrogación de etiquetas y algunos medios para comunicar la información a una computadora host o sistema de manejo de la información. El sistema también incluirá un medio para poder programar las etiquetas si es que no se provee por el fabricante. Comúnmente una antena se distingue como si fuera parte separada del sistema RFID. Si bien es cierto que su importancia justifica la atención debe verse como una característica que está presente tanto en lectores como en etiquetas, esencial para la comunicación entre ambos.

Para entender y apreciar las capacidades de los sistemas RFID es necesario considerar sus partes. También es necesario considerar los requerimientos del flujo de datos que influyen la elección de sistemas y los aspectos prácticos de la comunicación a través de la interfaz aérea. Considerando los componentes del sistema y su función dentro de la cadena de flujo de información es posible tomar los aspectos más importantes que influyen la aplicación efectiva de RFID. Sin embargo, es útil empezar considerando brevemente la manera en la cuál la comunicación inalámbrica se logra.

4.1.1 Comunicación inalámbrica y la interfaz gráfica

La comunicación entre las etiquetas y el lector es a través de la comunicación inalámbrica. Se pueden distinguir dos métodos para categorizar los sistemas RFID, uno se basa en la proximidad electromagnética o el acoplamiento inductivo y otro basado en la propagación de ondas electromagnéticas.

El acoplamiento es a través de las estructuras de antenas formando una característica integral tanto en etiquetas como en lectores. El término antena es generalmente considerado más apropiado para sistemas de propagación.

La información transmitida es sujeta a las influencias del medio o de los canales a través de los cuáles tiene que pasar, incluyendo la interfaz aérea. Ruido, interferencia y distorsión son fuentes de corrupción de la información que surgen en los canales de comunicación práctica. Éstas deben ser vigiladas de forma cercana para evitar errores en la recuperación de información. Además, la naturaleza de la información en los procesos de comunicación, siendo asíncronos o no síncronos en naturaleza, requiere atención a la forma en la cuál la información es comunicada. El proceso de estructurar el flujo de bit para acomodar estas necesidades comúnmente se denomina codificación de canal y aunque es transparente al usuario de un sistema RFID el esquema de codificación aplicado aparece en especificaciones del sistema. Varios esquemas de codificación se pueden distinguir y cada uno exhibe diferentes características de desempeño.

Para transferir información eficientemente a través de la interfaz aérea o del espacio que separa los dos componentes de comunicación se requiere que la información se superponga sobre un campo rítmico variable (senoidal) o una onda

portadora. Este proceso de superposición es precisamente una modulación y se tienen varios esquemas disponibles para estos propósitos, cada uno teniendo atributos particulares que favorecen su uso. Se basan esencialmente en el cambio de valor de uno de los elementos primarios de una fuente senoidal alterna, su amplitud, su frecuencia o su fase, de acuerdo con el flujo que porta los bits. En esta base uno puede distinguir la modulación por cambio de amplitud, de frecuencia o de fase (ASK, PSK o FSK).

4.1.2 Frecuencias portadoras

En los sistemas de comunicación alámbrica las limitaciones físicas de cableado permiten los enlaces de comunicación y las redes estar aislados uno del otro. El acercamiento que se adopta para los canales de radio comunicación es separar en base a la frecuencia.

Este requerimiento es generalmente cubierto por legislación gubernamental asignando diferentes partes del espectro electromagnético para diferentes propósitos. La asignación puede diferir dependiendo de las preocupaciones de los gobiernos. Los esfuerzos de estandarización buscan obviar problemas en este aspecto.

Tres rangos de frecuencia se distinguen para sistemas RFID, baja, media y alta frecuencia. La siguiente tabla resume estos tres rangos de frecuencia junto con las características típicas y ejemplos de áreas de aplicación.

Banda de frecuencia	Características	Aplicaciones típicas
Baja 100 – 500 kHz	Rango de lectura de bajo a mediano con baja velocidad de lectura	Control de acceso Identificación de animales Control de inventarios Inmovilizador de autos
Media 10 - 15 MHz	Rango de lectura de corto a medio, potencialmente barato y velocidad de lectura media	Control de acceso Tarjetas inteligentes
Alta 850 – 950 MHz 2.4 – 5.8 GHz	Largo rango de lectura Alta velocidad de lectura Línea de vista requerida Caro	Monitores de autos Sistemas de pago de peaje

Tabla 1. Asignación de frecuencias y su aplicación.

Se busca un grado de uniformidad en el uso de las frecuencias portadoras mediante tres áreas regulatorias: Europa y África (Región 1), América del Norte y del Sur (Región 2) y el Lejano Oriente, Asia y Australia (Región 3). Cada país maneja su asignación de frecuencias con lineamientos establecidos por las tres regiones. Desafortunadamente, no existe consistencia en la asignación de frecuencia, por lo que hay muy pocas frecuencias disponibles globalmente para esta tecnología. Supuestamente esto cambiará con el tiempo puesto que los países tienen que tratar de lograr cierta uniformidad para el año 2010.

Tres frecuencias portadoras son las representativas de la baja, media y alta frecuencia: 125 kHz, 13.56 MHz y 2.45 GHz. Sin embargo, existen 8 bandas de frecuencia en uso para aplicaciones RFID. Las aplicaciones para estas bandas de frecuencias se enlistan en la Tabla 2.

No todos los países del mundo tienen acceso a todas las bandas de frecuencia de la Tabla 1, puesto que algunas naciones han asignado estas bandas a otros usuarios. Dentro de cada país y dentro de cada rango de frecuencia existen regulaciones específicas que gobiernan el uso de estas frecuencias. Estas regulaciones se pueden aplicar a niveles de potencia e interferencia, así como a tolerancias de frecuencia.

Rango de frecuencia	Aplicaciones y comentarios
Menos de 135 kHz	Una gran variedad de productos disponibles para adaptarse a una variedad de aplicaciones, incluyendo identificación de animales, control de acceso y rastreo. Los sistemas de transponders que funcionen en esta banda no necesitan licencia en muchos países.
1.95 MHz, 3.25 MHz, 4.75 MHz y 8.2 MHz	Sistemas de vigilancia electrónica de artículos (EAS, Electronic article surveillance) utilizados en tiendas departamentales.
13 MHz – 13.56 MHz	Sistemas EAS e ISM (Industrial, Scientific and Medical).
27 MHz	Aplicaciones ISM
430 – 460 MHz	Aplicaciones ISM en la Región 1
902 – 916 MHz	Aplicaciones ISM en la Región 2. En Estados Unidos esta banda se utiliza para diferentes aplicaciones con prioridades distintas. Algunas de ellas incluyen pago de peaje, monitoreo de vehículos. En la Región 1 esta banda está ocupada por redes telefónica GSM.
918 – 926 MHz	RFID en Australia para transmisores con EIRP menor a 1 W.
2350 – 2450 MHz	Banda ISM reconocida en la mayor parte del mundo. IEEE 802.11 reconoce esta banda como aceptable para comunicaciones RF tanto en sistemas de banda ancha como de banda angosta.
5400 – 6800 MHz	Banda asignada para uso futuro. La FCC ha pedido proveer la asignación de esta banda para el uso de Servicios de Transporte Inteligente. En Francia el sistema TIS se basa en el pre – estándar europeo propuesto (preENV) para comunicaciones de vehículos en el carretera (vía microondas).

Tabla 2. Rangos de frecuencias para RFID.

4.1.3 Tasa de transferencia de información y el ancho de banda

La elección del campo o de la frecuencia portadora es de importancia primaria para determinar la tasa de transferencia. En términos prácticos la tasa de transferencia

es influenciada de manera primaria por la frecuencia de la onda portadora o del campo variante utilizado para transportar la información entre la etiqueta y el lector. Hablando de manera general entre más alta sea la frecuencia, más alta será la tasa de transferencia de información que se puede alcanzar. Esto está íntimamente ligado al ancho de banda disponible dentro de cierto espectro de frecuencia para el proceso de comunicación. El ancho de banda del canal necesita ser al menos ser del doble de la tasa de bit requerida para la aplicación que tenemos en mente. Donde se involucre asignación de banda angosta la limitación de la tasa de información puede ser una consideración importante. Utilizando 2.4 – 2.5 GHz en banda ancha, por ejemplo, se pueden alcanzar tasas hasta de 2 Mbps.

4.1.4 Rango y niveles de potencia

El rango que se puede lograr con un sistema RFID se puede determinar esencialmente por:

- La potencia disponible en el lector para comunicarse con las etiquetas
- La potencia disponible dentro de la etiqueta para responder
- La condiciones ambientales y estructuras (siendo las primeras más significativas a frecuencias más altas)

A pesar de que el nivel de potencia disponible es el factor determinante del rango la manera y eficiencia en que la potencia se emplea también influencia el rango. El campo u onda entregada por la antena se extiende en el espacio cercano y su fuerza disminuye con respecto a la distancia. La antena diseñada determinará la forma y el campo de propagación de la onda entregada, por lo que el rango se verá afectado por el ángulo entre la etiqueta y la antena.

En el espacio libre de obstrucciones o mecanismos de absorción la fuerza del campo se reduce de manera inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Para una onda que se propaga a través de una región en la cuál las reflexiones se presentan por el suelo y por los obstáculos, la reducción de la fuerza puede variar considerablemente, en algunos casos como una potencia cuarta inversa de la potencia. Donde surgen distintos caminos al fenómeno se le conoce como “atenuación multi – camino”. Es importante conocer cómo el ambiente interno y externo puede influenciar el rango de la comunicación en muchas aplicaciones.

La potencia dentro de las etiquetas es mucho menor que la del lector, requiriendo una capacidad de detección de alta sensibilidad dentro del lector para manejar las señales de respuesta. En algunos sistemas el lector constituye un receptor y está separado de la fuente de interrogación o transmisor, especialmente si el “up – link” es diferente al “down – link”.

A pesar de que es posible escoger niveles de potencia adecuados para diferentes aplicaciones no es posible ejercer completa libertad de elección. Al igual que existen restricciones para las frecuencias portadoras también existen limitaciones legislativas en niveles de potencia. Mientras que 100 – 500 mW son valores comunes para los sistemas RFID, los valores reales deben ser confirmados para las autoridades regulatorias en los países donde tenga aplicación. Las autoridades también deberán

indicar la forma en la cuál la potencia es entregada, en pulsos o continua, y los valores asociados permitidos.

4.1.5 Componentes de un sistema RFID

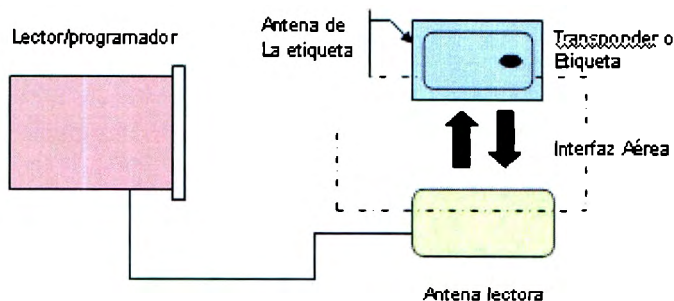


Figura 1. Componentes de un sistema RFID.

La palabra transponder, derivada de TRANSmitter / resPONDER, revela la función del dispositivo. La etiqueta responde a una petición transmitida para la información que transporta, siendo el modo de comunicación entre el lector y la etiqueta la interfaz aérea entre ambos. El término también sugiere los componentes esenciales que forman un sistema RFID – etiquetas y lector o interrogador. En ocasiones el término interrogador es intercambiable con el de lector, la diferencia radica en que el interrogador se compone del lector más un decodificador.

Los componentes básicos de un transponder se pueden observar en la Figura 2. De manera general se fabrican con circuitos integrados de baja potencia adecuados para ser interfaz con inductores externos para la generación de potencia (modo pasivo).

4.1.5.1 Características básicas de un transponder RFID

La memoria de un transponder puede integrar una memoria de sólo lectura (ROM), memoria de acceso aleatorio (RAM) y memoria no volátil para almacenamiento de información, dependiendo del tipo y de la sofisticación del dispositivo. La memoria basada en ROM es utilizada para implementar la seguridad de la información y las instrucciones del sistema operativo del transponder, las cuáles, en conjunto con el procesador o la lógica de procesamiento se involucra con las funciones de mantenimiento como el retraso en el tiempo de respuesta, el control de flujo de información y la potencia alimentada. La memoria basada en RAM es utilizada para facilitar el almacenamiento temporal de la información durante la interrogación y respuesta del transponder.

La antena del transponder es el medio por el cuál el dispositivo percibe el campo de interrogación y, donde el campo programador también sirve como medio para transmitir la respuesta del transponder al interrogador.

Un número de elementos, además de la frecuencia portadora, caracteriza los transponder RFID y forman la base de las especificaciones del dispositivo:

- Medio por el que se energiza el transponder

- Opciones de transporte de información
- Tasa de lectura de la información
- Opciones de programación
- Forma física
- Costos

4.1.5.1.1 Energización de las etiquetas

Para que las etiquetas trabajen requieren potencia, aunque los niveles sean verdaderamente pequeños (micro o miliwatts). Las etiquetas pueden ser pasivas o activas, la designación es determinada enteramente por la manera en que el dispositivo adquiere su potencia.

Las etiquetas activas se alimentan por una batería interna y por lo general son dispositivos de lectura /escritura. El uso de una batería significa que un transponder activo sellado tiene una vida finita. Existe un intercambio entre mayor tamaño y mayor costo comparado con las etiquetas pasivas.

En términos generales, los transponder activos permiten mayor rango de comunicación del que se puede esperar para los dispositivos pasivos, mejor inmunidad al ruido y mayores tasas de transmisión de la información cuando se utiliza para alimentar un modo de respuesta de frecuencia más alta.

Las etiquetas pasivas operan sin una fuente de batería interna, tomando su potencia para operar del campo generado por el lector. Las etiquetas pasivas por consecuencia son mucho más ligeras que las activas, menos costosas, y ofrecen una vida útil casi infinita. Las etiquetas pasivas tienen limitaciones de almacenamiento de información y su habilidad para un buen desempeño dentro de un ambiente electromagnético ruidoso. La sensibilidad y el desempeño en cuanto a orientación también están limitados por la potencia disponible. A pesar de estas limitaciones los transponders pasivos ofrecen ventajas en términos de costos y longevidad.

4.1.5.1.2 Opciones de transporte de datos

En términos de capacidad de información las etiquetas pueden ser desde bits hasta kilobits. Los dispositivos de un solo bit se utilizan esencialmente para propósitos de vigilancia. Los dispositivos caracterizados para almacenar datos hasta de 128 bits son suficientes para guardar un número de identificación serial, posiblemente con bits de paridad. Tales dispositivos pueden ser prefabricados o programables por el usuario. Las etiquetas utilizadas para almacenar datos hasta los 512 bits, son invariablemente programables por el usuario y son adecuadas para grabar número de identificación y otro tipo de información específica.

Tasa de lectura de la información. Ya se mencionó que la tasa de transferencia de información está ligada a la frecuencia de la portadora. Mientras más grande sea la frecuencia, mayores serán las tasas de transferencia. También se debe de apreciar que la información transmitida necesita un período finito de tiempo, y aunque sean milisegundos, puede ser una consideración importante cuando una etiqueta está pasando a través de una zona de interrogación.

Opciones de programación de la información. Dependiendo del tipo de información que contenga la etiqueta, ésta puede ser de sólo lectura, de una escritura y muchas lecturas (WORM, write once read many), o de lectura /escritura. Las etiquetas de sólo lectura son dispositivos de baja capacidad programados en la fuente, usualmente con un número de identificación. Los dispositivos WORM son programables por el usuario. Los dispositivos de lectura/escritura también son programables por el usuario pero permiten a éste cambiar la información almacenada en la etiqueta.

Forma física. Las etiquetas RFID vienen en una amplia variedad de formas físicas, tamaños y protecciones. Las etiquetas para el rastreo de animales, que se insertan debajo de la piel, pueden ser tan pequeñas como la punta de un lápiz. Pueden tener forma de tornillo para identificar árboles o artículos de madera, con forma de tarjeta de crédito para aplicaciones de acceso. Las etiquetas de plástico duro anti – robo que se pegan a la mercancía en tiendas también son etiquetas RFID.

Costos. El costo de las etiquetas depende obviamente del tipo y de la cantidad que se compre. Al incrementarse la complejidad de las funciones del circuito, la construcción y la capacidad de memoria se incrementa su costo.

La manera en la cuál el transponder se empaqueta para formar una unidad también tendrá cierto peso en el costo. Algunas aplicaciones donde ambientes hostiles se esperan, requerirán empaques robustos y tolerantes a químicos y a la temperatura. Este tipo de empaques sin duda representarán una porción significativa del costo total del transponder.

4.1.5.2 El lector/ interrogador

Los lectores / interrogadores difieren considerablemente en complejidad, dependiendo del tipo de etiquetas a las cuáles se les está dando soporte y a las funciones que se deben completar. Sin embargo, la función general es proveer el medio de comunicación con las etiquetas y facilitar la transferencia de información. Las funciones realizadas por el lector pueden incluir un sofisticado acondicionamiento de la señal, chequeo del error de paridad y su corrección. Una vez que la señal del transponder haya sido recibida correctamente y decodificada, se pueden aplicar algoritmos para decidir si la señal es una transmisión repetida, y entonces pueden dar instrucciones al transponder de interrumpir la transmisión. Este proceso es conocido como el “Protocolo de Comando de Respuesta” y es utilizado para resolver el problema de leer múltiples etiquetas en un espacio corto de tiempo. Utilizar interrogadores de esta manera algunas veces se denomina “Hands Down Polling”. Una alternativa, más segura, pero más lenta (Hands up polling) se refiere a que el interrogador busque etiquetas con identidades específicas y las interroga. Otra opción puede utilizar múltiples lectores multicanalizados en un solo interrogador, pero se incrementaría el costo.

4.1.5.3 Programadores de transponders

Los programadores de transponders son el medio por el que la información es entregada a los distintos tipos de etiquetas. La programación generalmente se lleva a cabo sin conexión, al principio de la producción.

Para algunos sistemas la re – programación se puede llevar a cabo en línea, particularmente si se utiliza como un archivo portátil interactivo de información dentro del ambiente de producción. La información deberá ser grabada durante cada proceso. Remover el transponder al final de cada proceso para leer el procesamiento de información previo, y programar la nueva información, naturalmente incrementaría el tiempo de procesamiento y sustancialmente quitaría flexibilidad a la aplicación. Al combinar las funciones de un lector / interrogador y de un programador, la información puede ser azezada o alterada en el transponder como sea requerido.

El rango para el cuál se puede alcanzar la programación es generalmente menor al rango de lectura en algunos sistemas donde posiciones cercanas son necesarias. Además, los programadores generalmente están diseñados para manejar una sola etiqueta al mismo tiempo. Sin embargo, los desarrollos están ahora satisfaciendo la necesidad de programación selectiva para un número de etiquetas presentes dentro del rango del programador.

4.1.6 Categorías de los sistemas RFID

Los sistemas RFID se pueden agrupar en 4 categorías:

- Sistemas EAS (electronic article surveillance), o sistemas de vigilancia electrónica de artículos.
- Sistemas de captura portátil de información
- Sistemas en red
- Sistemas de posicionamiento

Los sistemas de vigilancia electrónica de artículos son típicamente sistemas de un bit utilizados para percibir la presencia o ausencia de un artículo. El amplio uso para esta tecnología es en tiendas departamentales donde cada artículo es etiquetado y lectores con grandes antenas se posicionan en cada salida de la tienda para detectar la extracción sin autorización de un artículo (robo).

Los sistemas de captura de información portátiles se caracterizan por el uso de terminales portátiles de información con lectores integrales RFID y son utilizados en aplicaciones donde un alto grado de variación en la información requerida se presenta. Los terminales de los lectores portátiles capturan la información, la cuál se transmite después directamente a un sistema host de manejo de información vía comunicación por radio frecuencia o detenido para entrega por enlace.

Las aplicaciones en sistema de red se caracterizan generalmente por lectores en posiciones fijas dentro de un sitio dado y conectados directamente al sistema de manejo de información de red. Los transponders se posicionan en objetos en movimiento, o gente dependiendo de la aplicación.

4.1.7 Áreas de aplicación para RFID

Se pueden identificar aplicaciones potenciales para RFID en casi cualquier sector de la industria, comercio y servicios donde la información se reúne. Los atributos de RFID son complementarios con otras tecnologías de captura de información y por tanto ser capaces de satisfacer requerimientos particulares de aplicación que no

pueden acomodarse de forma adecuada por tecnologías alternativas. Las principales áreas de aplicación incluyen:

- Transportación y logística
- Manufactura y procesamiento
- Seguridad

Una gama de aplicaciones misceláneas se pueden distinguir, algunas de las cuáles crecen de manera constante. Incluyen:

- Identificación de animales
- Manejo de desperdicios
- Tiempo y asistencia
- Reconocimiento de maletas en tráfico aéreo
- Peaje en las carreteras

Con el surgimiento de estándares, la tecnología se desarrolla aún más y los costos se reducen considerablemente con este crecimiento, además de que nuevas áreas de aplicación se esperan.

Un número de factores influyen la facilidad de adecuarse de las aplicaciones RFID. Las necesidades de la aplicación deben ser determinadas cuidadosamente y examinadas con respecto a los atributos que RFID y otras tecnologías de recopilación de información pueden ofrecer.

4.2 Historia y situación actual de la tecnología

Los 90's fue una década significativa para RFID debido a que vio la implementación a gran escala de la recolecta electrónica de peaje en Estados Unidos. El primer sistema combinado de colecta del peaje con un sistema de manejo de tráfico fue implementado en Houston en 1992. La autopista 400 de Georgia en Estados Unidos actualizó sus equipos con lectores que se comunicarían con sus 21 etiquetas así como con las etiquetas existentes. Estos dos tipos de instalación fueron los primeros en implementar una capacidad multi – protocolo para aplicaciones de colecta de peaje.

Durante estos años también se despertó un gran interés por las aplicaciones de RFID en Europa. Tanto las tecnologías de microondas como las inductivas encontraron buen uso en colecta de peaje, control de acceso y una gran variedad de otras aplicaciones en el comercio.

Otro esfuerzo fue el desarrollo por parte de Texas Instruments (TI) del sistema TIRIS, usado en mucho automóviles para el control de encendido del motor. El sistema TIRIS desarrolló nuevas aplicaciones como ahorro de gasolina, acceso de vehículos.

Otras compañías en Europa se volvieron activas en la carrera para RFID con algunos desarrollos. Estas compañías incluían Microdesign, CGA, Alcatel, Bosch, Philips, Combitech, Baumer y Tagmaster. Un estándar pan – europeo se necesitó para aplicaciones en Europa. Aplicaciones en peaje y en trenes aparecieron en muchos países, incluyendo Australia, China, Hong – Kong, Filipinas, Argentina, Brasil, México, Canadá, Japón, Malasia, Singapur, Tailandia, Corea del Sur, Sudáfrica y Europa.

Con el éxito de esta aplicación, otros avances siguieron como el primer uso múltiple de etiquetas en diferentes negocios. Ahora una sola etiqueta puede darte acceso a estacionamientos, colecta de cuotas, acceso a ciertas áreas enrejadas.

Con el interés creciente en RFID dentro del trabajo de manejo de objetos, y la oportunidad para RFID de trabajar junto con los códigos de barras, existen muchos participantes en el mercado, algunos que estuvieron desde el principio, otros que se han ido y han vuelto.

La aplicación e interés en telemática y en comercio móvil llevará a RFID cada vez más cerca del consumidor. Recientemente, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) asignó espectro en la banda de 5.9 GHz para una expansión en sistemas de transporte inteligente para aplicaciones y servicios nuevos.

Dentro de diez años habrá una "población de lectores RFID" superior a los 300 millones de unidades y el número de etiquetas, que superará los 100 millones en 2006, alcanzará los 20.000 millones en 2008. Esta es una de las estimaciones que realizó Cisco en el III Seminario RFID, organizado por Intermec que se celebró el pasado 12 de enero en Barcelona y que contó también con la participación de IBM.

4.3 Compañías que utilizan RFID actualmente

Miles de compañías alrededor del mundo utilizan actualmente la tecnología RFID para mejorar sus eficiencias internas. Algunos ejemplos son los siguientes:

- Club Car. Fabricante de carros de golf la utilizan para mejorar la eficiencia de su línea de producción.
- Granjas Paramount. Uno de los proveedores mundiales más grandes de pistaches utilizan RFID para hacer la cosecha más eficiente.
- NYK Logistics. Utilizan RFID para mejorar el rendimiento de sus contenedores en su centro de distribución.

Los fabricantes de automóviles han usado RFID durante mucho tiempo para rastrear vehículos que se encuentran en construcción y se mueven a través de las plantas de manufactura. Sin embargo ya que las ondas de radio son rebotadas por el metal, estos sistemas de rastreo han requerido del uso de etiquetas RFID activas.

Avery Dennison, el más grande fabricante de etiquetas auto-adheribles, asegura que ha desarrollado y probado una nueva etiqueta pasiva de 915 MHz que podrá ser usada por la industria automotriz. La etiqueta tiene la característica de ser pasiva y sin embargo poder ser leída dentro de un ambiente metálico robusto. Cada etiqueta contiene un chip EPC Clase 0, es decir un circuito integrado de sólo-lectura que contiene un número de serie único codificado por el fabricante.

Una empresa austriaca está comercializando un sistema RFID que contiene una etiqueta a base de un cristal piezoeléctrico capaz de operar en temperaturas extremas. **Carinthian Tech Research** en Vilach, Austria, desarrolló esta nueva etiqueta pasiva RFID para poder tolerar las temperaturas de aplicaciones industriales y de ingeniería.

En lugar de guardar datos en silicio, el sistema de CTR está basado en el principio de usar ondas de acústica de superficie (surface acoustic waves SAW) a través

de un cristal para identificar un contenido RFID. La ventaja de esta etiqueta SAW que usa un cristal de litio-niobate en lugar de silicio es que puede operar hasta los 400°C, mientras que las de silicio sólo lo logran hasta los 200°C.

4.4 Estandarización para RFID

Todos los distribuidores grandes de RFID ofrecen sistemas propietarios, resultando en que varias aplicaciones e industrias tienen estándares basados en diferentes fabricantes con frecuencias y protocolos que no son compatibles. El estado actual de los estándares RFID se encuentra en severo desarreglo – estándares basados en sistemas RFID incompatibles existen para diferentes aplicaciones.

La falta de sistemas abiertos que permitan el intercambio ha lisiado severamente el crecimiento de la industria RFID como un todo. Sin embargo, un número importante de organizaciones ha estado trabajando para unificar los sistemas RFID, tanto en Estados Unidos como en Europa, donde RFID ha hecho mayores incursiones en el mercado. Mientras tanto en Estados Unidos, el grupo X3T6 de la ANSI que une a grandes fabricantes y usuarios de RFID, está desarrollando actualmente un borrador basado en la operación de los sistemas a una frecuencia portadora de 2.45 GHz, la cuál se quiere que se adopte por ISO. ISO ya adoptó estándares internacionales para RFID como ISO 11784 y 11785.

4.5 Situación en México

Desde hace un par de años ya se habla de implantar EPC y RFID en la República Mexicana; de hecho, el presente año se ha dedicado a la evangelización sobre la tecnología a fin de acercarla a las empresas para que la conozcan y descubran sus ventajas.

De acuerdo con IDTechEX, el valor total del mercado de RFID en el mundo, incluyendo sistemas y servicios, va a dispararse de 1,950 millones de dólares en 2005 a por lo menos 26,900 millones de dólares en 2015, lo cual representa una enorme oportunidad e interés de adoptar la tecnología. Casi 14 veces en diez años.

Durante los últimos meses diferentes desarrolladores e integradores de RFID se han reunido con las organizaciones para acelerar su empleo. Durante 2005 se corrieron pruebas piloto para evaluar las ventajas que conlleva utilizar EPC, y al ser un estándar diversas industrias se han mostrado interesadas en su implantación; entre ellas se encuentra el sector farmacéutico, de vinos y licores, así como de bienes de consumo y otros de alto valor, como puede ser el de los aparatos electrónicos, además del sector detallista.

De manera puntual, en el sector detallista existen al menos cuatro proyectos piloto que corren en centros de distribución y directamente al interior de las tiendas a nivel de *pallets* y cajas de mercancía. Aunque las empresas se han mostrado cautelosas en su implantación, toman las precauciones necesarias, tales como la del uso de los estándares establecidos por EPCglobal.

Dentro de las empresas que se encuentran en México desarrollando tecnología RFID (lectores y antenas) se encuentran Sun Microsystems, HP, Oracle, SAP, Qualtec

México, Cyberworks y Sterling Commerce. Es importante mencionar que estas empresas son de origen extranjero, y lo único que hacen es distribuir los productos creados y diseñados en países como Estados Unidos. Tenemos el ejemplo de Qualtec, la cual simplemente distribuye los productos de la empresa estadounidense Samsys.

En México es la Asociación Mexicana de Estándares para el Comercio Electrónico (AMECE) la encargada de llevar a cabo el programa de instrumentación de esta tecnología.

A la fecha, alrededor de 200 compañías prueban el sistema y realizan proyecciones financieras para integrarlo a sus procesos, en tanto que firmas importantes como Bimbo, Gigante, Chedraui, Comercial Mexicana, Liverpool y Elektra estudian la posibilidad.

4.6 Riesgos a la salud

4.6.1 Límites de los niveles de Campos eléctricos y magnéticos

La electricidad se transmite por largas distancias a través de líneas de alto voltaje. Los transformadores reducen estos voltajes tan altos para la distribución local en las casas y en los negocios. Las plantas de distribución y transmisión de electricidad, además del cableado casero y los electrodomésticos, son los responsables de los niveles de potencia eléctrica y los campos electromagnéticos en el hogar. En las casas que no están localizadas cerca de líneas de alto voltaje, estos campos pueden llegar a $0.2 \mu\text{T}$.

En las casas que están justo debajo de las líneas de transmisión, estos campos son mucho más intensos. Las densidades de flujo magnético a nivel del suelo pueden llegar a varias μT . Los campos eléctricos pueden llegar hasta 10 kV/m . Sin embargo, estos campos bajan considerablemente con la distancia.

Fuerzas de campo eléctrico típicas medidas cerca de los electrodomésticos (a 30 cm)

Aparato Electrodoméstico	Fuerza de campo (V/m)
Estereo	180
Plancha	120
Refrigerador	120
Licuada	100
Tostador	80
Secadora de cabello	80
Televisión	60
Cafetera	60
Aspiradora	50

Horno Eléctrico	8
Foco	5
Valor límite de referencia	5000

Tabla 3. Fuerza de campo para aparatos electrodomésticos.

1. Los niveles de los campos electromagnéticos en los hogares son causados principalmente por las plantas de transmisión y distribución de electricidad o por aparatos electromagnéticos.
2. Las intensidades de los campos que generan los aparatos electrodomésticos varían mucho. Tanto el campo eléctrico como el magnético como el campo eléctrico decremantan rápidamente con la distancia. En cualquier caso, los campos generados por estos aparatos están por debajo del nivel límite de referencia para riesgos a la salud.
3. Los usuarios de teléfonos celulares experimentan niveles mucho más elevados de los campos ya mencionados, sin embargo, éstos no demuestran tener consecuencias negativas en la salud.
4. Muchos estudios han demostrado que la exposición a los niveles de campos electromagnéticos en el ambiente es bastante bajo.

4.6.2 Estándares Actuales

Los estándares se han hecho para proteger la salud, en especial para limitar la sobre exposición a los niveles presentes de campos electromagnéticos en el ambiente. La referencia de los límites de los campos electromagnéticos la dicta la ICNIRP (Internacional Commission on Non – Ionizing Radiation Protection). Esta organización no gubernamental reconocida por la Organización mundial de la Salud, evalúa los resultados científicos alrededor del mundo. Basándose en una revisión profunda de esta literatura, la ICNIRP produce lineamientos recomendando los límites de exposición. Estos lineamientos son revisados periódicamente y actualizados si es necesario.

La siguiente tabla resume los lineamientos de exposición para tres áreas que se han vuelto el centro de la atención pública: electricidad en casa, estaciones de teléfonos móviles y hornos de microondas.

Resumen de los lineamientos de exposición de ICNIRP

Frecuencia	Frecuencia de la potencia eléctrica en Europa		Frecuencia de las Bases de Teléfonos Celulares		Frecuencia para hornos de microondas
	50 Hz	50 Hz	900 MHz	1.8 GHz	2.45 GHz
	Campo Eléctrico (V/m)	Campo Magnético (μT)	Densidad de potencia (W/m ²)	Densidad de potencia (W/m ²)	Densidad de potencia (W/m ²)
Límite de exposición al público	5 000	100	4.5	9	10
Límite de exposición ocupacional	10 000	500	22.5	45	

Tabla 4. Lineamientos de exposición de ICNIRP

Como podemos ver, la frecuencia del celular es muy similar a la de nuestra antena UHF, por lo que podemos decir que los parámetros de riesgos a la salud también son similares. La exposición típica para bases de celulares está muy por debajo del límite, alrededor de 0.1 W/m².

4.6.2.1 Normas Oficiales Mexicanas

Existe principalmente una NOM involucrada en el tratamiento de señales emitidas a las frecuencias manejadas en el desarrollo del proyecto. Esta norma es la siguiente:

NOM-EM-086-SCT1-1994

Estaciones del servicio de aficionados

Establece la terminología y especificaciones técnicas normativas requeridas para la emisión de señales a ciertos rangos de frecuencia. Presenta los parámetros técnicos normalizados aplicables a los equipos de radiocomunicación, además de valores y tolerancias mínimas para UHF (300 a 3000 MHz). Para la consulta de la norma completa referirse al Apéndice A.

4.7 Mercury4 de ThingMagic

Mercury4 es un lector ágil de cuarta generación, inteligente, listo para uso en red y capaz de leer muchos tipos de etiquetas. Entre sus especificaciones incluye las de ISO, EPC Clase 0, EPC Clase 1 y, en cuanto esté listo, EPC Generación 2.

Este dispositivo es el primero con un procesador Intel, capaz de manejar datos a una tasa de 266 millones de instrucciones por segundo.

El Mercury4 en su primer modelo soporta las regulaciones UHF de Norte América.

Cisco Systems y el MIT (Massachusetts Institute of Technology) decidieron invertir en una compañía pequeña de RFID como ThingMagic debido a que la tecnología se encuentra en este momento en su etapa de madurez.

ThingMagic no divulgó el desglose de las inversiones y el crédito, pero en total suma 6 millones de dólares, de los cuáles Cisco proveyó la mayoría. Este dinero adicional junto con dos rondas de financiamiento en el 2005 hace un total de 21 millones de dólares para esta compañía. “Creo que el hecho que Cisco esté invirtiendo en una pequeña compañía de RFID como ThingMagic es una señal que el mercado ha crecido en madurez” señala Christine Overby analista de Forrester Research.

4.7.1 Operación del Mercury4

El Thing Magic Mercury 4, es un aparato que utiliza tecnología RFID para escribir y leer información en etiquetas RFID.

El Mercury 4, soporta distintas configuraciones de antenas UHF y permite transferir y recibir información con una computadora por medio de una conexión directa. Esta conexión puede ser por medio de un cable serial, pero también se logra con una conexión LAN por medio de un cable Ethernet.

Antes que otra cosa, conocimos el equipo y las partes que lo componen. Es importante resaltar que para conectar a la alimentación el Mercury 4 se tiene que conectar a un regulador de voltaje para evitar cualquier pico de corriente y así tener una mayor seguridad en el equipo.

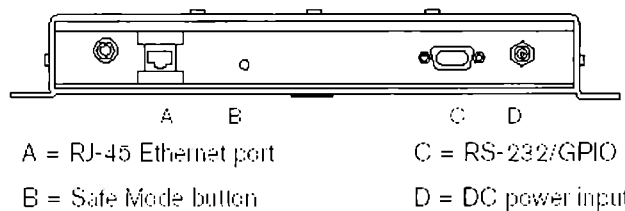


Figura 2. Puertos del Mercury4.

En el equipo se pueden conectar hasta 4 antenas distintas, y las entradas para su conexión vienen distribuidas de la siguiente forma:

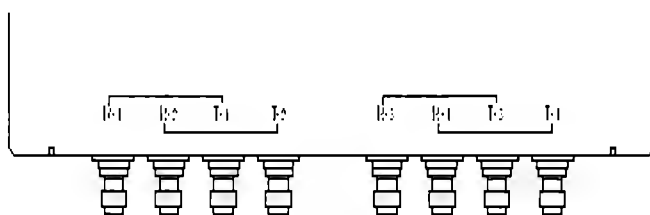


Figura 3. Conexiones para las antenas en el Mercury4.

Es importante resaltar que para que la antena quede conectada y lista para usarse es necesario conectar las antenas antes de iniciar el equipo, ya que si se dejan sin conexión los puertos quedarán deshabilitados y se tendrá que reiniciar el equipo para que la antena pueda ser detectada.

A las antenas se les adaptó en la parte de atrás un sujetador para poder colocarlo sobre un tripié y así poder realizar las pruebas. Las antenas con las que contamos son de Thing Magic y son tanto lectoras como transmisoras para poder leer y escribir etiquetas. Cada antena tiene dos entradas una para la parte lectora indicada con una etiqueta Rx y la otra es la transmisora. Para poder conectar las antenas al Mercury 4 se utilizan cables BNC – coaxial.

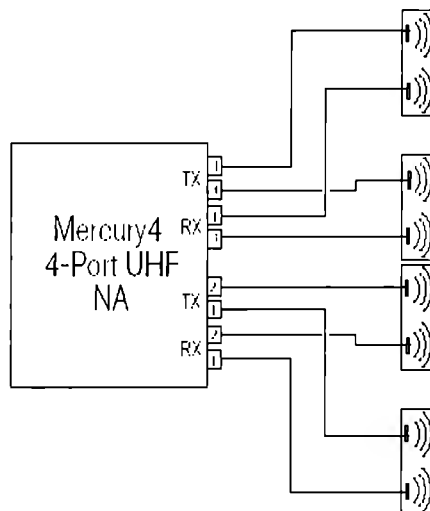


Figura 4. Conexión de antenas al Mercury4 a través de sus 4 puertos.

Una vez conectadas las antenas y la computadora al Mercury 4 se puede encender el equipo. A la computadora se le necesita poner una dirección IP de la misma red (10.0.0.0) y con la misma máscara de subred (255.255.255.0) que la que tiene el Mercury 4. Para poder entrar a la interfaz gráfica, nos conectamos a Internet por medio de Explorer y se teclea directamente la dirección 10.0.0.101, que es la del Mercury 4 e inmediatamente entramos a una página de inicio que muestra un menú.

Status	Muestra la configuración de operación actual.
Quero	Permite buscar y leer etiquetas RFID
Write	Permite escribir las etiquetas RFID
Settings	Permite modificar la configuración
Firmware	Sirve para actualizaciones
Restart	Para reiniciar el equipo
Diagnostics	Configuración de operación actual del equipo.
Help	Ayuda

Tabla 5. Palabras de código para programación del Mercury4.

En la parte de Query es la que a nosotros nos resulta más útil ya que es donde se hacen lecturas de la etiqueta, y como nuestra antena va a ser lectora, es aquí donde realizaremos las pruebas. Es muy sencillo utilizarlo ya que solo se ingresa a la pantalla de Query y se indica el protocolo de las etiquetas que van a ser leídas. Es importante que se señale el protocolo exacto a utilizar en caso de conocerlo y si no se conoce el tipo de etiquetas que se van a leer hay una opción que permite leer todo tipo de etiquetas (EPC0 o EPC1 por ejemplo).

Se oprime el botón de START para que la antena comience a hacer lecturas, las etiquetas se pasan cerca de la antena y en la pantalla de la computadora empiezan a aparecer el número de lecturas y las etiquetas que se están leyendo.

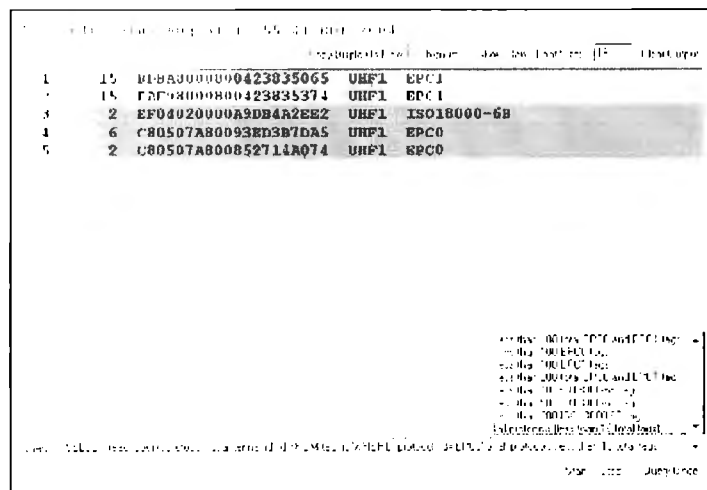


Figura 5. Interfaz del Mercury 4.

Una vez echas las lecturas requeridas se oprime el botón de STOP para detener las lecturas; también existe una opción que dice Query Once, con la cual al oprimirlo solo lee una vez.

También nos enseñaron a escribir etiquetas, aunque esto nosotros no la vamos a utilizar. Para poder realizar este proceso nos metemos a la pantalla de WRITE y ahí se oprime el botón que dice SUBMIT QUERY y te aparece los datos de la etiqueta en la pantalla, ahí tu puedes modificar el ID de la etiqueta simplemente cambiándolo y

después se presiona el botón de Make Update y ya queda escrita la etiqueta. Es importante resaltar que solo se pueden escribir etiquetas que no estén protegidas.

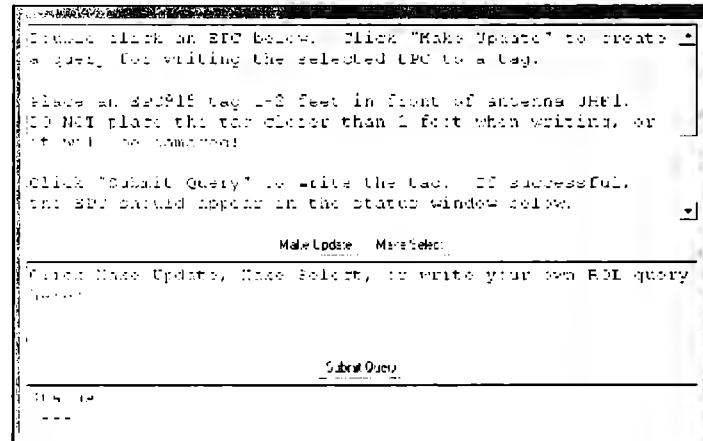


Figura 6. Otra vista de interfaz del Mercury 4.

Después de haber aprendido el funcionamiento básico nos dedicamos a hacer pruebas con las diferentes etiquetas y nos fue proporcionado un manual en formato pdf para seguir estudiando sobre el Mercury 4.

5 DESARROLLO

5.1 Metodología

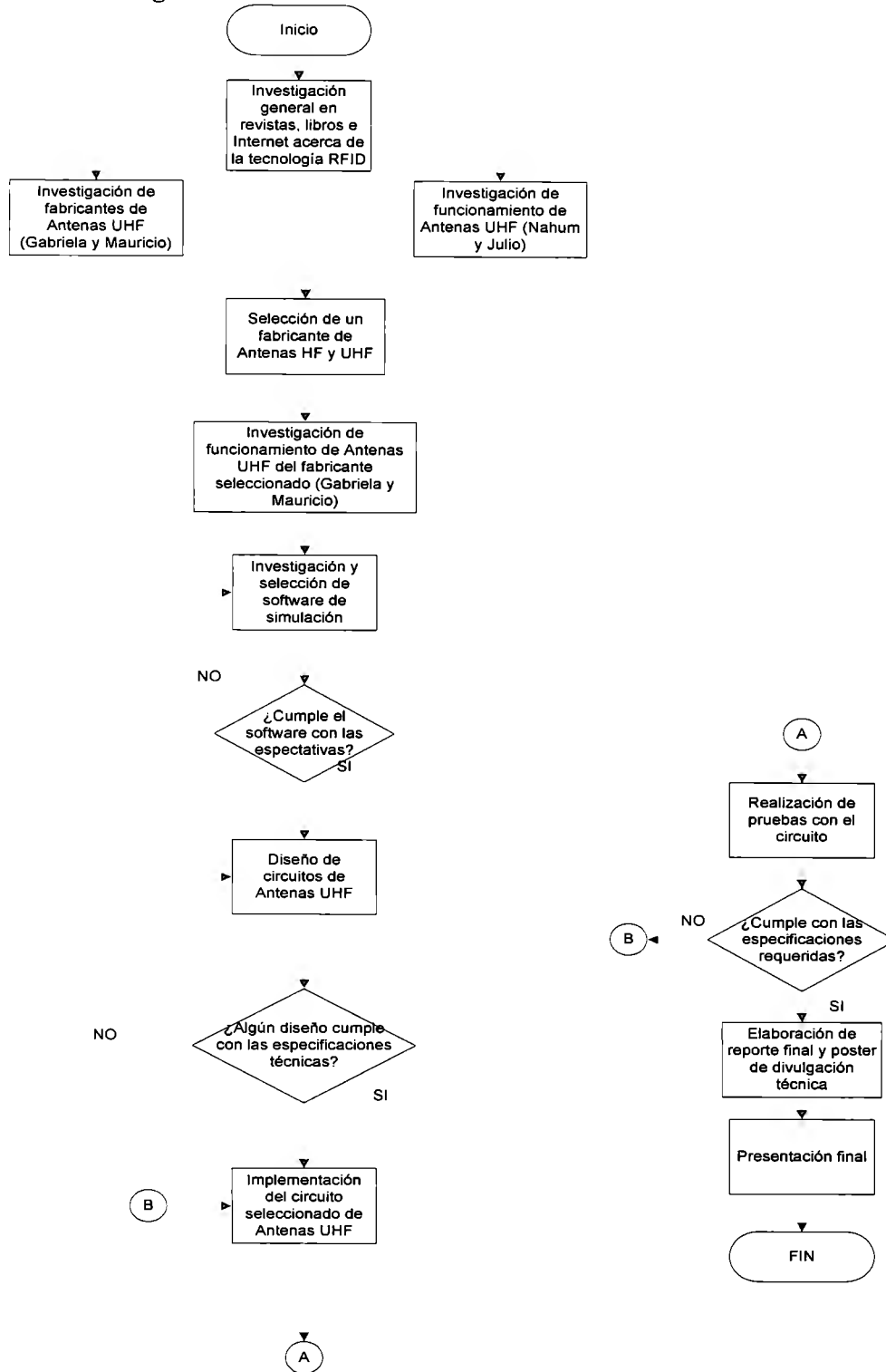


Figura 7. Metodología

5.2 Software de simulación

Una de las actividades más importantes que se nos planteó para poder construir las antenas de nuestro proyecto fue la de realizar simulaciones de ciertas propuestas de diseño que nos permitieran predecir su comportamiento y que así se pudieran ir optimizando hasta alcanzar el mejor desempeño posible. Para hacer las simulaciones nos dimos a la tarea de buscar un Software de Simulación Electromagnética que tuviera las mejores capacidades.

Para comenzar con el proceso de selección del Software de Simulación Electromagnética, el primer paso fue realizar una búsqueda en páginas de Internet. En un principio encontramos una opción de este tipo de software y creímos que era adecuada. Sin embargo, en una plática con nuestro patrocinador, éste nos pidió que realizáramos una búsqueda mucho más extensa y sería para que tuviéramos más opciones y por lo tanto más fundamentos para elegir correctamente. Nos pidió que elaboráramos un Benchmark de las diferentes opciones de Software de Simulación que encontráramos. Básicamente, un Benchmark es una herramienta de evaluación y comparación de las alternativas en un proceso de selección. En nuestro caso más específico, el Benchmark por realizar es un documento que analiza y destaca el rendimiento del software del cual se especializa la prueba. Sirve como referencia para comparar este tipo de productos dentro del mercado.

Ante la petición de nuestro patrocinador fue necesario realizar una búsqueda mucho más profunda en páginas de Internet hasta encontrar más opciones serias y confiables de este tipo de software. Nuestro proceso de búsqueda nos llevó a encontrar 5 productos de software simulación y a sus respectivos proveedores, los cuales se enlistan a continuación:

Producto	Proveedor	Calificación
SuperNec	Poynting Group	8.5
HFSS	Ansoft	10.0
Microstripes	Flomerics	9.0
MicroWave Studio	Computer Simulation Technology (CST)	9.5
Cadfeko	Feko	7.0

Tabla 6. Software de simulación

El siguiente paso fue comenzar a capturar la información disponible sobre el software. Esta información provino tanto de las páginas mismas de los proveedores como de otros documentos en los cuales encontramos que se aplicaban estos productos a algún diseño en específico. Esta información fue incluyéndose dentro del Benchmark.

Debido al grado de especialización que tienen algunos de estos productos y sus respectivos proveedores, las páginas de Internet no suelen tener información sobre precios o proceso de compra. Es necesario contactar a la empresa y pedir este tipo de información vía correo electrónico. Esa fue nuestra siguiente tarea. Este contacto con el proveedor fue alcanzado en 4 de las 5 opciones de software que encontramos, el único del cual no recibimos respuesta fue de Feko. Desafortunadamente para nosotros, este proceso fue algo lento ya que los encargados en cada empresa se tomaron en promedio 3 semanas para contestar los correos. Aún así, fue alentador ver que existió el interés en las dos partes. De hecho, durante la comunicación con los proveedores, no sólo recibimos la información de compra, sino información más amplia y específica sobre las verdaderas capacidades del software.

El último paso dentro de este proceso fue la elaboración final del Benchmark basándonos en la información recavada de cada una de las opciones de software de simulación electromagnética. Este Benchmark incluye toda la información relevante para el análisis de las capacidades y la comparación de estos productos, y tiene como fin el permitir la correcta elección de la mejor alternativa. Este Benchmark que fue presentado al patrocinador para su pertinente evaluación. El documento elaborado se presenta en el anexo 1.

5.3 Antenas

Teoría Electromagnética

Para situaciones que son estáticas, el campo eléctrico y el campo magnético no se encuentran acoplados y existe independientemente el uno de otro. Los campos eléctricos describen la interacción entre cargas. Los fenómenos que involucran corrientes son caracterizados con campos magnéticos. Experimentos posteriores a estos conocimientos mostraron que con cantidades variantes con el tiempo, es decir corrientes alternas, los campos eléctrico y magnético se acoplan y existen simultáneamente. En 1873, James Clerk Maxwell consolidó el trabajo previo de Coulomb, Ampere, Faraday, y otros en un grupo de ecuaciones que esencialmente predicen todos los fenómenos electromagnéticos en un nivel macroscópico. Maxwell también introdujo el concepto de corrientes de desplazamiento, las cuales eventualmente llevaron a descubrir la existencia de las ondas electromagnéticas.

Los campos son cantidades vectoriales, es decir, se les caracteriza con una magnitud y una dirección. La magnitud de campos estáticos puede variar con la posición. Los campos variantes con el tiempo son funciones de la posición y el tiempo. Usando coordenadas cartesianas, un campo eléctrico arbitrario puede ser expresado como:

$$E = E_x(x, y, z, t)\hat{x} + E_y(x, y, z, t)\hat{y} + E_z(x, y, z, t)\hat{z} \quad (1)$$

E_x , E_y y E_z son las componentes x , y y z del vector.

Los campos electromagnéticos pueden ser modelados con las ecuaciones de Maxwell. Al considerar campos en una región localizada en el espacio, la forma diferencial es la apropiada. Para este caso, la ecuación de Maxwell de forma fasorial se escribe como:

$$\nabla \times E = -j\omega B \quad (2)$$

$$\nabla \times H = j\omega D + J \quad (3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (4)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (5)$$

donde E es la intensidad de campo eléctrico, en volts por metro [V/m]; B es la densidad de flujo magnético, en webster por metro cuadrado [Wb/m²]; H es la intensidad de campo magnético, en amperes por metro [A/m]; D es la densidad de flujo eléctrico, en coulombs por metro cuadrado [C/m²]; J es la densidad de corriente eléctrica, en amperes por metro cuadrado [A/m²]; y ρ es la densidad de cargas eléctricas, en coulombs por metro cúbico [C/m³]. En el espacio libre, $D = \epsilon_0 E$ y $B = \mu_0 H$, donde $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m es la permitividad (del espacio libre) y $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m es la permeabilidad. Usualmente la corriente J y la densidad de carga ρ son considerados como las fuentes de los campos. Cuando se habla de los campos radiados por antenas, el E y H son los de más interés.

Ya que la corriente es el flujo de cargas, J está relacionada con ρ . Esta relación se expresa por la ecuación de continuidad

$$\nabla \cdot J = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (6)$$

que es otra forma de establecer la conservación de las cargas. En cualquier punto, cualquier cambio de cargas en el tiempo, como lo indica la derivada, debe ser causado por una corriente fluyendo hacia dentro o fuera del punto, debida a la divergencia.

Con problemas que conciernen el comportamiento de los campos en el espacio, la forma integral de las ecuaciones de Maxwell resulta apropiada. En forma fasorial éstas son:

$$\int_c E \cdot dl = -j\omega \iint_s B \cdot dS \quad (7)$$

$$\int_c H \cdot dl = \iint_s J \cdot dS + j\omega \iint_s D \cdot dS \quad (8)$$

$$\iint_s D \cdot dS = \iiint_v \rho \cdot dV \quad (9)$$

$$\iint_s B \cdot dS = 0 \quad (10)$$

La ecuación (7) es la Ley de Faraday. Para una antena de bucle, la parte izquierda de la integral entrega el voltaje inducido en las terminales debido a la parte derecha de la integral de la derivada temporal de la densidad de flujo magnético

pasando por el bucle. La ecuación (8) es una versión modificada de la Ley de Ampere. Para campos estáticos ($\omega = 0$), la integral del campo magnético alrededor de una trayectoria cerrada cede el paso a la corriente fluyendo por el área encerrada por la trayectoria. Ya que las líneas de flujo eléctrico comienzan y terminan sobre cargas, la ecuación (9) indica que la densidad total de flujo eléctrico pasando por una superficie cerrada es igual a la carga total contenida dentro del volumen. No existen cargas magnéticas conocidas, por lo tanto la ecuación (10) dice que las líneas de densidad de flujo magnético se cierran sobre ellas mismas.

Cuando los campos eléctricos y magnéticos existen dentro de los cuerpos materiales, éstos interactúan con los electrones, los átomos y las moléculas del material. Un campo eléctrico aplicado polariza los átomos y las moléculas al desplazar los electrones cargados negativamente del núcleo positivo, creando un componente adicional a la densidad de flujo eléctrico. Para la mayoría de los medios la densidad de flujo eléctrico es:

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (11)$$

donde E es el campo eléctrico aplicado y P el vector de polarización eléctrica. Cuando el medio es lineal, P está relacionado con E por:

$$P = \epsilon_0 x_c E \quad (12)$$

donde x_c es la susceptibilidad eléctrica y usualmente es compleja. Sustituyendo (12) en (11), se puede definir la permitividad del medio como:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon_0(1 + x_c) \quad (13)$$

La parte real de la ecuación (13) se puede dividir por ϵ_0 y de esta forma se le llama constante dieléctrica:

$$\epsilon_r = \epsilon' / \epsilon_0 \quad (14)$$

Este parámetro generalmente aparece en las hojas de especificaciones del material. La parte imaginaria de ϵ tiene que ver con las pérdidas en el material. La razón de la parte imaginaria con la parte real es conocida como pérdida tangencial y se expresa como:

$$\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon' \quad (15)$$

Es deseable que el parámetro $\tan \delta$ sean pequeño, del orden de 0.001 o similar.

Existen ciertos materiales magnéticos en los que el campo magnético aplicado induce momentos magnéticos de dipolo que contribuyen a la densidad de flujo magnético. De forma similar a la permitividad, B se relaciona con H con la siguiente ecuación:

$$B = \mu_0(1 + x_m)H = \mu H \quad (16)$$

donde μ es la permeabilidad y x_m es la susceptibilidad. Como la permitividad, μ puede ser compleja si existen pérdidas. La permeabilidad relativa es:

$$\mu_r = \mu' / \mu_0 \quad (17)$$

Para el caso de los materiales no magnéticos $\mu = \mu_0$, por lo tanto $\mu_r = 1$.

En algunos materiales, como pueden ser los metales, existen electrones que pueden reaccionar libremente ante la presencia de un campo eléctrico. Cuando esto sucede, estas cargas se mueven en dirección del movimiento del campo, provocando el flujo de una corriente. La relación de la densidad de corriente resultante y el campo aplicado se expresa como:

$$J = \sigma E \quad (18)$$

donde σ es conocida como la conductividad. Para muchos materiales que son buenos conductores, la conductividad se encuentra en el rango de 1 a 5×10^8 S/m.

5.3.1 Consideraciones generales para antenas.

El Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) define una antena como aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas (IEEE Std. 145-1983). Si bien sus formas son muy variadas, todas las antenas tienen en común el ser una región de transición entre una zona donde existe una onda electromagnética guiada y una onda en el espacio libre.

La misión de la antena es radiar la potencia que se le suministra con las características de direccionalidad adecuadas a la aplicación. Por ejemplo, en radiocomunicaciones fijas interesa que las antenas sean direccionales.

Toda onda se caracteriza por su frecuencia (f) y su longitud de onda (λ), ambas relacionadas por la velocidad de propagación en el medio, que habitualmente en antenas tiene las propiedades del vacío ($c=3 \times 10^8$ m/s), con $c=\lambda f$. El conjunto de frecuencias, o espectro de frecuencias, se divide por décadas en bandas, como la mostrada en la tabla 7.

Nombre	Abreviatura inglesa	Banda ITU	Frecuencias	Longitud de onda
			Inferior a 3 Hz	> 100.000 km
Extremely low frequency	ELF	1	3-30 Hz	100.000 km – 10.000 km
Super low frequency	SLF	2	30-300 Hz	10.000 km – 1000 km
Ultra low frequency	ULF	3	300-3000 Hz	1000 km – 100 km
Muy baja frecuencia Very low frequency	VLF	4	3-30 kHz	100 km – 10 km
Baja frecuencia Low frequency	LF	5	30-300 kHz	10 km – 1 km
Media frecuencia Medium frequency	MF	6	300-3000 kHz	1 km – 100 m
Alta frecuencia High frequency	HF	7	3-30 MHz	100 m – 10 m
Muy alta frecuencia Very high frequency	VHF	8	30-300 MHz	10 m – 1 m
Ultra alta frecuencia Ultra high frequency	UHF	9	300-3000 MHz	1 m – 100 mm
Super alta frecuencia Super high frequency	SHF	10	3-30 GHz	100 mm – 10 mm
Extremely high frequency	EHF	11	30-300 GHz	10 mm – 1 mm
			Sobre 300 GHz	< 1 mm

Tabla 7. Denominación de las bandas de frecuencias por década.

Cada aplicación y cada banda de frecuencias presentan características peculiares que dan origen a unas tipologías de antenas muy diversas. En una forma amplia, los tipos más comunes se pueden agrupar en los siguientes grandes bloques:

Antenas alámbricas. Se distinguen por estar construidas con hilos conductores que soportan las corrientes que dan origen a los campos radiados. Pueden estar formadas por hilos rectos (dipolo, V, rómbica), espiras (circular, cuadrada o de cualquier forma arbitraria) y hélices.

Antenas de apertura y reflectores. En ellas la generación de la onda radiada se consigue a partir de una distribución de campos soportada por la antena y se suelen excitar con guías de onda. Son antenas de apertura las bocinas (piramidales, y cónicas), las aperturas y las ranuras sobre planos conductores, y las bocas de guía.

Agrupaciones de antenas. En ciertas aplicaciones se requieren características de radiación que no pueden lograrse con un solo elemento; sin embargo, con la combinación de varios de ellos se consigue una gran flexibilidad que permite obtenerlas.

5.3.2 Parámetros de antenas en transmisión.

Una antena formará parte de un sistema más amplio de radiocomunicaciones. Por lo tanto importará caracterizarla con una serie de parámetros que la describan y permitan evaluar el efecto sobre el sistema de una determinada antena, o bien especificar el comportamiento deseado de una antena para incluirla en ese sistema.

Las características de interés para una antena son sus patrones de radiación, directividad o ganancia, potencia isotrópica efectiva irradiada, polarización, apertura de haz radiado, impedancia, eficiencia y ancho de banda.

5.3.2.1 Impedancia

La antena ha de conectarse a un transmisor y radiar el máximo de potencia posible con un mínimo de pérdidas en ella. La antena y el transmisor han de adaptarse para una máxima transferencia de potencia en el sentido clásico de circuitos. Habitualmente el transmisor se encuentra alejado de la antena y la conexión se hace mediante una línea de transmisión o guía de ondas, que participa también en esa adaptación, debiéndose encontrar su impedancia característica, su atenuación y su longitud.

A la entrada de la antena puede definirse la *impedancia de entrada* Z_e mediante relaciones tensión-corriente en ese punto. Poseerá una parte real $R_e(\omega)$ y una imaginaria $X_e(\omega)$, ambas dependientes en general de la frecuencia. Si Z_e no presenta una parte reactiva a una frecuencia, se dice que es una antena resonante. Dado que la antena radia energía, hay una pérdida neta de potencia hacia el espacio debida a la radiación, que puede ser asignada a una resistencia de radiación R_r , definida como el valor de la resistencia que disiparía óhmicamente la misma potencia que la radiada por la antena.

Superpuestas a la radiación tendremos las pérdidas que puedan producirse en la antena habitualmente óhmicas en los conductores, si bien en las antenas de ferrita también se producen pérdidas en el núcleo. Todas las pérdidas pueden globalizarse en una resistencia de pérdidas R_Ω . La resistencia de entrada es la suma de las de radiación y pérdidas.

La impedancia de entrada es un parámetro de suma importancia, ya que condiciona las tensiones de los generadores que se deben aplicar para obtener determinados valores de corriente en la antena y, en consecuencia, una determinada potencia radiada.

La existencia de pérdidas en la antena hace que no toda la potencia entregada por el transmisor sea radiada, por lo que se puede definir un rendimiento o eficiencia de la antena η , mediante la relación entre la potencia radiada y la entregada, o equivalentemente entre la resistencia de entrada de la antena, si hubiera sido ideal (sin pérdidas), y la que presenta realmente.

$$\eta = \frac{P_{radiada}}{P_{entregada}} = \frac{R_r}{R_r + R_\Omega} \quad 19)$$

5.3.2.2 Patrón de radiación.

El patrón de radiación es una gráfica de coordenadas polares (angulares) que representan las intensidades de campo o densidades de potencia para diferentes posiciones angulares con respecto al punto en el que se encuentra radiando la antena. Si esta gráfica se realiza en términos de intensidad del campo eléctrico E o de la densidad de potencia se le conoce como patrón absoluto, es decir que existe una distancia variable y una potencia constante. Si se grafica estos dos parámetros pero con respecto a un punto de referencia, se le conoce como patrón relativo, o sea una potencia variable y una distancia constante. Este tipo de patrones son bidimensionales, pero, desde luego la radiación de una antena tiene una naturaleza tridimensional. Es por eso que es necesario

realizar este tipo de gráficas tanto para el plano horizontal como para el vertical. Como el campo magnético se deriva directamente del eléctrico, la representación podría realizarse a partir de cualquiera de los dos, siendo habitual que los diagramas se refieran al campo eléctrico.

La representación en coordenadas cartesianas permite observar los detalles en antenas muy directivas, mientras que el diagrama polar suministra una información mas clara de la distribución de la potencia en las diferentes direcciones del espacio. En un patrón de radiación típico, la zona en la cual la radiación es máxima, se le denomina haz principal o lóbulo principal. Las zonas que rodean a los máximos de menor amplitud se les denominan lóbulos secundarios.

La apertura del haz de una antena es la separación angular entre dos puntos en los cuales sólo se logra medir media potencia (-3 dB) de la potencia máxima directiva en el lóbulo mayor del patrón de radiación de una antena, que se suele tomar en uno de los planos principales. La apertura del haz de una antena también es conocida como ancho del haz de -3 dB, ancho de haz de media potencia o ancho de lóbulo. La ganancia de la antena es inversamente proporcional a la apertura del haz. Las antenas normales tienen apertura de haz de 30° a 60°, pero no es raro que las antenas de microondas de alta ganancia tengan una apertura de haz hasta de 1°.

El ancho de haz entre ceros es la separación angular de las direcciones del espacio en las que el lóbulo principal toma un valor mínimo.

La relación de lóbulo principal a secundario es el cociente, expresado en dB, entre el valor del diagrama en la dirección de máxima radiación y en la dirección del máximo del lóbulo secundario. Normalmente, dicha relación se refiere al lóbulo secundario de mayor amplitud, que suele ser adyacente al lóbulo principal.

La relación delante-atrás es el cociente, también en dB, entre el valor del diagrama en la dirección del máximo y el valor en la dirección diametralmente opuesta.

Si un diagrama de radiación presenta simetría de revolución en torno a un eje se dice que la antena es omnidireccional.

Se denomina antena isótropa a una antena ideal que radie la misma intensidad de radiación en todas las direcciones del espacio. Aunque no existe ninguna antena de estas características, es de gran utilidad para definir algunos parámetros más.

5.3.2.3 Directividad.

Existe el término de ganancia directiva y el término de ganancia de potencia, y éstos a veces se confunden. La ganancia directiva es la relación de la densidad de potencia irradiada en una dirección específica entre la densidad de potencia irradiada al mismo punto por una antena de referencia (generalmente una antena isotrópica), asumiendo que ambas antenas irradian la misma cantidad total de potencia. La ganancia directiva máxima se llama directividad. La ecuación de definición es:

$$D = \frac{P}{P_{ref}} \quad (20)$$

Un segundo parámetro relacionado directamente con la directividad es la ganancia de la antena G . Su definición es semejante, pero la comparación no se establece con la potencia radiada, sino con la entregada a la antena. Ello permite tener en cuenta las posibles pérdidas en la antena, ya que entonces no toda la potencia entregada es radiada al espacio. La ganancia y la directividad están relacionadas con la eficiencia del sistema.

Si la antena no posee pérdidas, cosa habitual a altas frecuencias, ambos parámetros son equivalentes.

5.3.2.4 Polarización.

La polarización de una antena es la orientación del campo eléctrico que es irradiado por ésta. Otra forma de explicarlo es que la polarización se refiere a los planos geométricos por los cuales se pueden desplazar las líneas de campo eléctrico. Una antena puede estar polarizada linealmente (en general, horizontal o verticalmente si se supone que los elementos de la antena están en alguno de esos planos), elípticamente o circularmente. Si el campo magnético irradiado está polarizado circularmente, se dice que la antena tiene una polarización circular. Lo mismo aplica a los demás tipos de polarización.

El sentido de giro del campo eléctrico, tanto en las ondas circularmente polarizadas como en las elípticas, se dice que es a derechas si sigue el convenio de avance en la dirección de propagación, o bien si al alejarse la onda de un observador, éste ve rotar el campo en el sentido de las agujas de un reloj, y a izquierdas si es sentido contrario.

Se define la relación axial de una onda elípticamente polarizada como la relación entre los ejes mayor y menor de la elipse. Toma valores comprendidos entre uno e infinito.

5.3.2.5 Ancho de banda.

Todas las antenas, debido a su geometría finita, están limitadas a operar satisfactoriamente en una banda o margen de frecuencias. Este intervalo de frecuencias, en el que un parámetro de antena determinado no sobrepasa unos límites prefijados, se conoce como ancho de banda de la antena. Puede ser definido de múltiples parámetros: diagrama de radiación, directividad, impedancia, etc., en contraposición a la definición habitual en circuitos, que se hace sobre la impedancia. Dicho de otra forma el ancho de banda de una antena se define como el intervalo de frecuencias dentro del cual el funcionamiento de la antena es satisfactorio. En la mayoría de los casos se considera como la diferencia entre las frecuencias de media potencia, la alta y la baja en el espectro, pero a veces indica variaciones en la impedancia de entrada de la antena. El ancho de banda de una antena también se expresa como un porcentaje de frecuencia óptima de operación de esa antena. Para obtener este tipo de ancho de banda se puede usar la siguiente expresión:

$$BW = \frac{f_H - f_L}{f_o} \times 100 \quad (21)$$

donde f_H es la frecuencia alta de media potencia, f_L es la frecuencia baja de media potencia y f_0 es la frecuencia central de operación de la antena.

5.3.2.6 Campo cercano y lejano.

El campo de radiación cercano a una antena no es igual que el que está a una gran distancia. El término campo cercano se refiere a la gráfica de radiación cerca de una antena, y el término campo lejano indica una gráfica de radiación a gran distancia. Durante medio ciclo, se irradia potencia desde una antena, donde algo de la potencia se almacena en forma temporal en el campo cercano. Durante el siguiente medio ciclo, la potencia en el campo cercano regresa a la antena. Esta acción se parece a la forma en la que un inductor almacena y libera energía. En consecuencia, el campo cercano se llama a veces campo de inducción. La potencia que llega al campo lejano continúa irradiándose y alejándose, y nunca regresa a la antena. En consecuencia, a veces al campo lejano se le llama campo de radiación. La potencia irradiada suele ser la más importante de las dos y, en consecuencia, las gráficas de radiación son para el campo lejano. El campo cercano se define como la zona dentro de la distancia D^2/λ de la antena, siendo λ la longitud de onda y D el diámetro de la antena, en la mismas unidades.

5.3.2.7 EIRP

La potencia isotrópica efectiva irradiada (effective isotropic radiated power EIRP) se define como la potencia equivalente de transmisión y se expresa de la siguiente forma:

$$EIRP = P_{rad} D_t \quad (22)$$

donde P_{rad} es la potencia total irradiada y D_t es la ganancia directiva de la antena. Esta ecuación se puede escribir en función de la potencia de entrada y la ganancia de potencia de la antena:

$$EIRP = P_{ent} A_t \quad (23)$$

donde P_{ent} es la potencia total de entrada de la antena y A_t es la ganancia de potencia de la antena de transmisión.

La $EIRP$ se puede entender como la potencia equivalente que tendría que irradiar una antena isotrópica para alcanzar la misma densidad de potencia en la dirección elegida y a determinada distancia, que la antena que se pretende estudiar.

5.3.3 Parámetros de antenas en recepción.

Una antena capta de una onda incidente sobre ella parte de la potencia que transporta y la transfiere al receptor. La antena actúa como un sensor e interacciona con la onda y con el receptor, dando origen a una familia de parámetros asociados con la conexión circuital a éste y otra vinculada a la interacción electromagnética con la onda incidente.

5.3.3.1 Adaptación.

Desde los terminales de la antena, el receptor se ve como una impedancia de carga $Z_L=R_L+jX_L$, mientras que el receptor ve a la antena como un generador ideal de tensión V_{ca} e impedancia $Z_a=R_a+jX_a$. La transferencia de potencia será máxima cuando haya adaptación conjugada ($Z_L=Z_a^*$). Entonces la potencia entregada por la antena a la carga será

$$P_{Lm\acute{a}x} = \frac{|V_{ca}|^2}{4R_a} \quad (24)$$

En general, si no hay adaptación tendremos

$$P_L = P_{Lm\acute{a}x} C_a \quad (25)$$

donde C_a es el coeficiente de desadaptación, dado por

$$C_a = \frac{4R_a R_L}{(R_a + R_L)^2 + (X_a + X_L)^2} \quad (26)$$

5.3.3.2 Área y longitud efectiva.

La antena extrae potencia del frente de onda incidente, por lo que presenta una cierta área de captación o área efectiva A_{ef} , definida como la relación entre la potencia que entrega la antena a su carga (supuesta para esta definición sin pérdidas y adaptada a la carga) y la densidad de potencia de la onda incidente, que representa físicamente la porción del frente de onda que la antena ha de interceptar y drenar de él toda la potencia contenida a la carga.

5.3.4 Temperatura de ruido de la antena.

Una antena recibe, además de señal, ruido. A la potencia de ruido disponible en los terminales de una antena receptora se le asocia una temperatura de ruido de la antena T_a , entendida como la temperatura a la que tendría que estar una resistencia para producir una potencia de ruido igual, es decir

$$P_N = \frac{V_N^2}{4R} = kT_a B \quad (27)$$

donde P_N es la potencia de ruido disponible en bornes de la antena, B el ancho de banda, $k=1,38 \times 10^{-23}$ J/K la constante de Boltzman, R la resistencia y V_N la tensión (rms) en circuito abierto.

La relación señal-ruido (S/N) de una antena receptora es el cociente entre las potencias de señal y de ruido recibidas, expresado habitualmente en decibelios. En el caso ideal de antenas y medios sin pérdidas y sin desadaptaciones resulta

$$S/N = \frac{P_L}{P_N} = \frac{P_r D_T A_{efR}}{4\pi r^2 kT_a B} \quad (28)$$

La sensibilidad de un receptor es la relación señal-ruido mínima para que el sistema funcione correctamente y condiciona el máximo alcance de comunicación

$$r_{\text{máx}} = \left(\frac{P_r D_T A_{\text{efR}}}{4\pi k T_a B (S/N)_{\text{mín}}} \right)^{1/2} \quad (29)$$

5.3.5 Acoplamiento de impedancias

Para entender el acoplamiento de impedancias entre una antena y un lector es necesario entender algunos conceptos básicos, como lo es el coeficiente de reflexión, relación de onda estacionaria, línea de transmisión, etc. Empezaremos a explicar cada uno de estos conceptos de tal forma que podamos entender mejor la forma de acoplar los dispositivos.

5.3.5.1 Línea de transmisión concéntrica o coaxial

Las líneas de transmisión de conductores paralelos son adecuadas para aplicaciones en bajas frecuencias. Sin embargo, con las altas frecuencias aumentan demasiado sus pérdidas por radiación y en dieléctrico, así como su susceptibilidad a la interferencia externa. Por lo anterior, se usan mucho los conductores coaxiales en aplicaciones de alta frecuencia, para reducir las pérdidas y para aislar las trayectorias de transmisión. El cable coaxial básico consiste en un conductor central rodeado por un conductor externo concéntrico, a distancia uniforme del centro. A frecuencias de trabajo relativamente altas, el conductor externo coaxial proporciona un excelente blindaje contra la interferencia externa. Sin embargo no es económico usar un blindaje con frecuencias relativamente bajas.

5.3.5.2 Ondas incidentes y reflejadas

Una línea de transmisión ordinaria es bidireccional: la energía se puede propagar por igual en ambas direcciones. El voltaje que se propaga de la carga a la fuente se llama voltaje incidente, y el que se propaga de la carga hacia la fuente se llama voltaje reflejado. De igual manera hay corriente incidente y reflejada. En consecuencia, la potencia incidente se propaga hacia la carga, y la potencia reflejada se propaga hacia la fuente. El voltaje y la corriente incidentes siempre están en fase cuando la corriente es de carácter resistivo.

5.3.5.3 Líneas de transmisión resonantes y no resonantes

Una línea de transmisión sin potencia reflejada se llama línea plana o no resonante. Una línea de transmisión es no resonante si su longitud es infinita o si termina en una carga resistiva igual al valor óhmico de su impedancia característica. En una línea plana, el voltaje y la corriente son constantes en toda su longitud, si se supone que no tiene pérdidas. Cuando la carga no es igual a la impedancia característica de la línea, algo de la potencia se refleja y va hacia la fuente.

5.3.5.4 Coeficiente de reflexión

El coeficiente de reflexión es una cantidad vectorial que representa la relación del voltaje reflejado entre el voltaje incidente, o la corriente reflejada entre la corriente incidente. La definición matemática del coeficiente de reflexión, representado por la letra gamma mayúscula Γ , es

$$\Gamma = E_r/E_i \text{ o } I_r/I_i \quad (30)$$

Siendo Γ = coeficiente de reflexión (adimensional)

E_i = voltaje incidente

E_r = voltaje reflejado

I_i = corriente incidente

I_r = corriente reflejada

En la ecuación se puede notar que el valor máximo, y el peor de los casos para $\Gamma = 1$, cuando $E_r = E_i$, y el valor mínimo, y de condición ideal, es cuando $\Gamma = 0$ ($E_r = 0$).

5.3.5.5 Ondas estacionarias

Cuando $Z_o = Z_L$, toda la potencia incidente es absorbida por la carga. A esto se le llama línea compensada. Cuando $Z_o \neq Z_L$, algo de la potencia incidente queda absorbida en la carga y algo se regresa (se refleja a la fuente). Es lo que llamamos línea no compensada o línea descompensada. En una línea no compensada hay dos ondas electromagnéticas que viajan en direcciones opuestas, al mismo tiempo (de hecho, a esas ondas se les llama ondas viajeras). Las dos ondas viajeras establecen un patrón de interferencia llamada onda estacionaria. Cuando las ondas incidente y reflejada pasan una por la otra, se producen patrones estacionarios de voltaje y corriente de línea. Esas ondas se llaman estacionarias porque parecen permanecer en su lugar fijo de línea, y solo varían de amplitud. La onda estacionaria tiene mínimos (nodos) separados por una mitad de longitud de onda de las ondas viajeras, y tienen máximos (antinodos) también separados por una mitad de longitud de onda.

5.3.5.6 Relación de onda estacionaria

La relación de onda estacionaria (SWR, de standing-wave ratio) se define como la relación del voltaje máximo al voltaje mínimo, o de la corriente máxima entre la corriente mínima de una onda estacionaria en una línea de transmisión. A ello también se le llama relación de voltajes de onda estacionaria (VSWR, por voltage standing-wave ratio). En esencia, la SWR es una medida de falta de compensación entre la impedancia de carga y la impedancia característica de la línea de transmisión. La ecuación correspondiente es

$$\text{SWR} = V_{\max} / V_{\min} \quad (31)$$

Los máximos de voltaje se presentan cuando las ondas incidente y reflejada están en fase (es decir, sus máximos pasan por el mismo punto de la línea, con la misma polaridad), y los mínimos de voltaje se presentan cuando las ondas incidente y reflejada están desfasadas 180° . Las descripciones matemáticas son:

$$V_{\max} = E_i + E_r$$

$$V_{\min} = E_i - E_r$$

Por lo anterior la ecuación se puede escribir como sigue

$$SWR = V_{\max} / V_{\min} = E_i + E_r / E_i - E_r \quad (32)$$

En esta ecuación se puede ver que cuando las ondas incidente y reflejada tienen igual amplitud, $SWR = \infty$. Es el peor de los casos. También se puede ver que cuando no hay onda reflejada ($E_r = 0$), $SWR = E_i / E_i$, es decir 1. Este caso se presenta cuando $Z_o = Z_L$ y es el caso ideal.

5.3.5.7 Acoplamiento de impedancias en la línea de transmisión

La potencia se transfiere cuando a una carga cuando no hay ondas reflejadas, esto es, cuando la carga es puramente resistiva e igual a Z_o . Siempre que la impedancia característica de una línea de transmisión con su carga no estén balanceadas (sean iguales), habrá ondas estacionarias en la línea, y no se transfiere la potencia máxima a la carga. Las ondas estacionarias causan pérdida de potencia, falla del dieléctrico, ruido, radiación y señales fantasmas. Así de ser posible, una línea de transmisión se debe adaptar a su carga. Para adaptar una línea de transmisión a una carga que tenga una impedancia distinta de Z_o se usan dos técnicas comunes. Son la compensación con un transformador de un cuarto de longitud de onda mediante línea de acoplamiento.

5.3.5.7.1 Adaptación con transformador de un cuarto de longitud de onda

Los transformadores de un cuarto de longitud de onda se usan para compensar las líneas de transmisión con cargas puramente resistivas cuya resistencia no sea igual a la impedancia característica de la línea. Téngase en cuenta que un transformador de un cuarto de longitud de onda en realidad no es un transformador, sino más bien una sección de línea de transmisión de un cuarto de longitud de onda que funciona como si fuera un transformador. La impedancia de entrada a una línea de transmisión varía desde un valor máximo hasta uno mínimo o viceversa, cada cuarto de longitud de onda. Así, una línea de transmisión de un cuarto de longitud de onda de largo funciona como un transformador elevador o un transformador reductor, dependiendo de si Z_L es mayor o menor que Z_o . Un transformador de un cuarto de longitud de onda no es un dispositivo de acoplamiento de impedancia de banda ancha; es de un cuarto de longitud de onda en una sola frecuencia. Las transformaciones de impedancia para una línea de transmisión de un cuarto de longitud de onda son las siguientes:

- 1.- $R_L = Z_o$: la línea de un cuarto de longitud de onda funciona como transformador con relación de vueltas 1:1
- 2.- $R_L > Z_o$: la línea de un cuarto de longitud de onda funciona como transformador reductor.
- 3.- $R_L < Z_o$: la línea de un cuarto de longitud de onda funciona como transformador elevador.

Como los transformadores, uno de un cuarto de longitud de onda se pone entre una línea de transmisión y su carga. El transformador de un cuarto de longitud de onda no es más que un tramo de línea de transmisión de un cuarto de longitud de onda de largo.

5.3.5.7.2 Adaptación con línea de acoplamiento

Cuando una carga es puramente inductiva o puramente capacitiva no absorbe energía. El coeficiente de reflexión es 1, y la relación de onda estacionaria (SWR) es infinita. Cuando la carga es una impedancia compleja, y este suele ser el caso, es necesario eliminar la componente reactiva para adaptar la línea de transmisión a la carga. Para este objeto se utilizan líneas de acoplamiento. Una línea de acoplamiento a una línea de transmisión no es más que un tramo adicional de línea de transmisión que se conecta entre los hilos de la línea primaria, tan cerca como sea posible de la carga. La susceptancia de la línea se usa para sintonizar la susceptancia de la carga. Para la adaptación con línea de acoplamiento se colocan líneas en corto o abiertas. Sin embargo, se prefieren las líneas en corto, porque las líneas abiertas tienen tendencias a irradiar, en especial a frecuencias más elevadas.

El proceso de adaptar una carga a una línea de transmisión con una línea de acoplamiento en corto es el siguiente:

- 1.- Ubicar un punto tan cerca de la carga como sea posible, donde el componente conductivo de la admitancia de entrada sea igual a la admitancia característica de la línea de transmisión.
- 2.- Fijar la línea puesta en corto al punto de la línea de transmisión determinado en el paso 1.
- 3.- Dependiendo si en el punto localizado en el paso 1 el componente reactivo es inductivo o capacitivo, ajustar la longitud de la línea.

5.3.5.7.3 Línea de acoplamiento usando el diagrama de Smith

Las soluciones matemáticas para el cálculo de impedancias de líneas de transmisión son laboriosas. En consecuencia se acostumbra usar gráficas para resolver los problemas de impedancias en líneas de transmisión.

Hay varias gráficas en las que se presentan las propiedades de las líneas de transmisión. Sin embargo, las más útiles son aquellas que expresan las relaciones de impedancia que existen a lo largo de una línea de transmisión sin pérdida, para diversas condiciones de carga. El diagrama de Smith es la calculadora más usada en líneas de transmisión de este tipo. Es un tipo especial de sistema de coordenadas de impedancia, que retrata la relación entre la impedancia en cualquier punto a lo largo de una línea de transmisión uniforme, entre la impedancia en cualquier otro punto de la línea. Entre los parámetros que se grafican en la gráfica de Smith están los siguientes:

- 1.- Impedancia (o admitancia) en cualquier punto a lo largo de una línea de transmisión.
 - a. Magnitud del coeficiente de reflexión
 - b. Ángulo del coeficiente de reflexión, en grados
- 2.- Longitud de la línea de transmisión entre dos puntos cualquier, en longitudes de onda.
- 3.- Atenuación entre dos puntos cualesquiera.
 - a. Coeficiente de pérdida de onda estacionaria.
 - b. Pérdida por reflexión
- 4.- Relación de ondas estacionarias de voltaje o corriente
 - a. Relación de ondas estacionarias
 - b. Límites de voltaje y corriente debidos a ondas estacionarias.

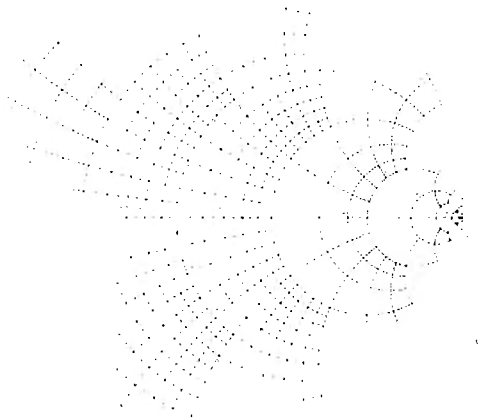


Figura 13. Diagrama de Smith

5.3.5.7.4 Impedancia de entrada y la gráfica de Smith

Con la gráfica de Smith se puede determinar la impedancia de entrada de una línea de transmisión a cualquier distancia de la carga. Las dos escalas externas de la gráfica de Smith indican la distancia, en longitudes de onda. La escala externa muestra la distancia de la carga al generador, y aumenta en dirección de las manecillas del reloj, y la segunda escala muestra la distancia de la fuente a la carga y aumenta en dirección de las manecillas del reloj. Sin embargo, ninguna de las escalas indica necesariamente la posición de la fuente o de la carga. Una revolución completa (360°) representa una distancia de la mitad de una longitud de onda (0.5λ), y la mitad de una revolución (180°) representa una distancia de un cuarto de longitud de onda (0.25λ), etcétera.

5.3.5.8 Acoplamiento de impedancias por antena panel

Los tipos de acoplamiento antes mencionados, tienen que ver con la línea de transmisión. Ahora se mostrará otro tipo de acoplamiento que se puede hacer al conectar una antena panel con un lector.

Mirando la variación de la corriente (campo magnético) y el voltaje (campo eléctrico) a lo largo del panel, la corriente es mínima cerca de los bordes y máxima en el centro del panel. Mientras que el campo eléctrico es cero en el centro y máximo en los bordes. La siguiente figura ayuda a entender estos conceptos.

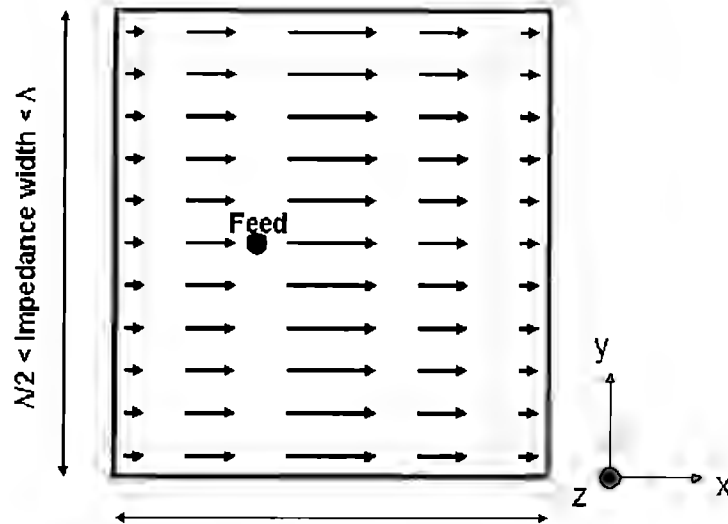


Figura 14. Distribución de la corriente en la superficie del panel.

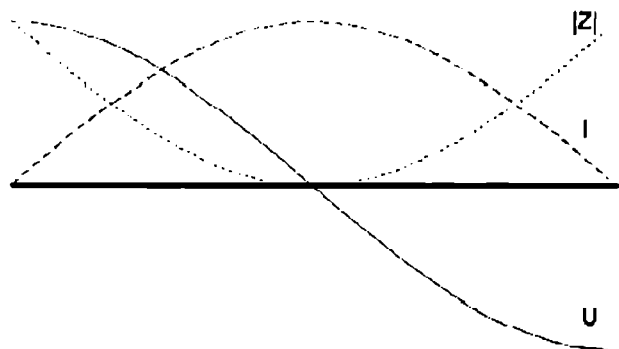


Figura 15. Distribución del Voltaje (U), Corriente (I) e Impedancia Z a lo largo del panel

De la magnitud de la corriente y el voltaje, podemos concluir que la impedancia es mínima (teóricamente cero) en el centro del panel y máxima (típicamente de 200 Ω , pero dependiendo de la Q de la cavidad) cerca de los bordes. Puesto de otra forma, hay un punto a lo largo del eje x en donde la impedancia es 50 Ω .

Con ayuda de un software de simulación como los mencionados anteriormente podemos encontrar el punto en donde se puede poner la alimentación a fin de tener un acoplamiento para nuestra antena y la línea de transmisión.

5.4 Funcionamiento de antenas UHF

Las antenas son de diferentes tamaños y formas dependiendo de la aplicación que se le quiera dar. Las características de la antena son determinadas por su forma, tamaño y el tipo de material del cual esta hecho. Algunos tipos básicos de antenas son descritos a continuación.

5.4.1 Dipolo de media onda.

El dipolo de media onda es una clase de antena entre las más usadas por frecuencias mayores de 2 MHz, ya que a menores frecuencias la hace prohibitiva sus dimensiones físicas. Al dipolo de media onda se le conoce como antena de *Hertz*.

Una antena de Hertz es una antena resonante. Esto es, tiene un múltiplo de cuartos de longitud de onda de largo, y tiene circuito abierto en los extremos lejanos. A lo largo de una antena resonante se desarrollan ondas estacionarias de voltaje y corriente. Cada polo de la antena se ve como si fuera un tramo de línea de transmisión de un cuarto de longitud de onda.

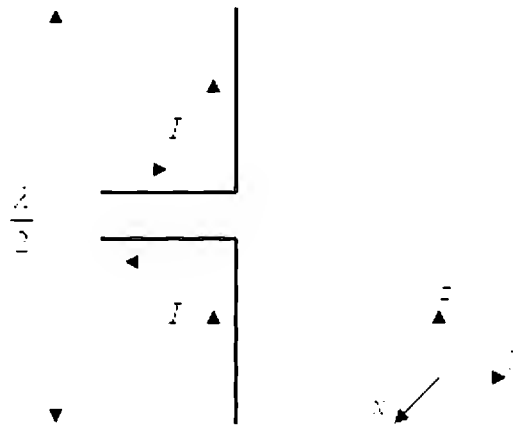


Figura 16. Dipolo de media onda

El dipolo es alimentado por dos líneas de transmisión, donde las dos corrientes en los conductores son sinusoidales y de igual amplitud, pero de direcciones contrarias. Por lo tanto, debido a los efectos de cancelación, la radiación no ocurre de la línea de transmisión. La ganancia típica de un dipolo es de 2 dB y tiene un ancho de banda cerca del 10%. La siguiente figura muestra el patrón de radiación de un dipolo de media onda.

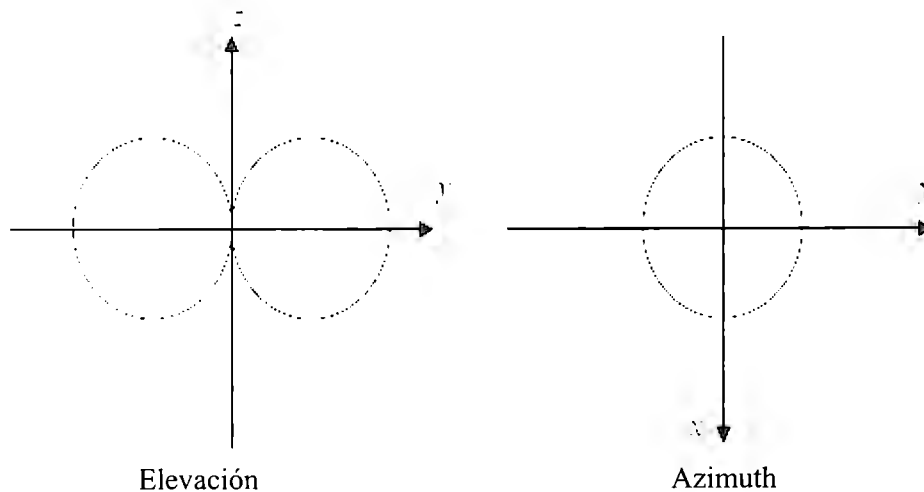


Figura 17. Patrón de radiación de un dipolo de media onda.

5.4.2 Antena de lazo

La antena de lazo es un conductor no recto en la forma de una curva cerrada ya sea en círculo o en cuadro con un espacio entre el conductor para formar las terminales como se muestra en la figura 18.

Hay dos tipos de antenas de lazo, las eléctricamente pequeñas o eléctricamente largas. Si el lazo total de la circunferencia es muy pequeño en comparación de la longitud de onda ($L \ll \lambda$), entonces se dice que la antena de lazo es eléctricamente pequeña. Una antena de lazo eléctricamente larga tiene una circunferencia cercana a la longitud de onda.

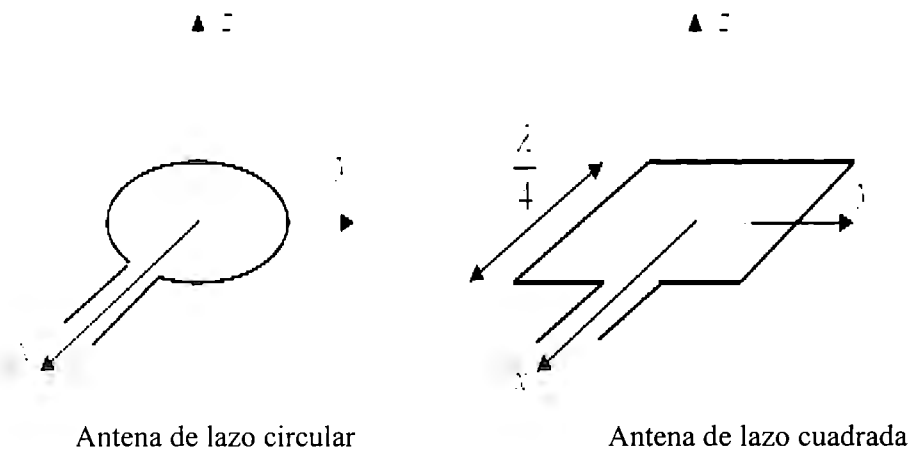


Figura 18. Antena de lazo

El patrón de radiación es idéntico que el del dipolo, solo que el dipolo está verticalmente polarizado, mientras que la antena de lazo está horizontalmente polarizada. El patrón de radiación de una antena de lazo larga es diferente que el de una pequeña. Por una longitud de onda, la radiación es máxima a la normal (plano z del eje) en la antena de lazo cuadrada. En el plano del lazo, hay un vacío en la dirección paralela al lado que contiene la alimentación (sobre el eje x), y hay un lóbulo en la dirección perpendicular al lado que contiene la alimentación (sobre el eje y). Las antenas de lazo tienen por lo general una ganancia de -2 dB a 3 dB y un ancho de banda alrededor del 10%.

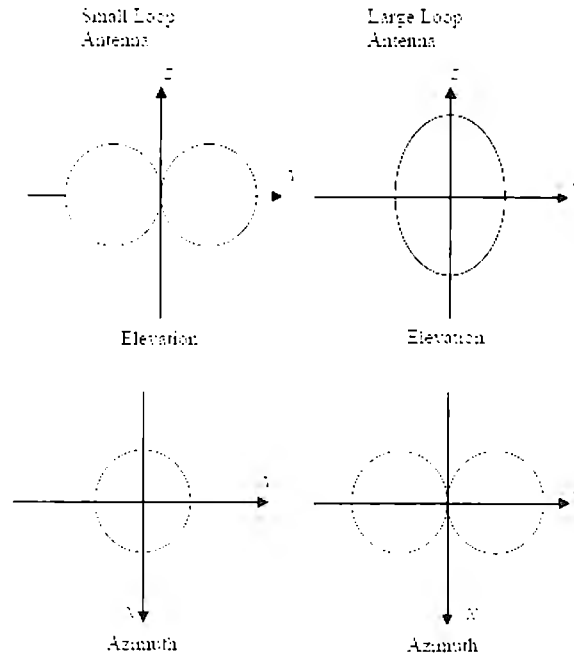


Figura 19. Patrón de radiación una antena de lazo pequeña y larga.

En la sección anterior se mostraron algunas antenas. Otra antena comúnmente usada es la antena de panel microstrip. El diseño de una antena panel microstrip para aplicaciones de RFID será explicada en la siguiente sección.

5.4.3. Antena de panel microstrip

5.4.3.1 Introducción.

La idea para los radiadores microstrip data de los años cincuenta y debido a un concepto propuesto por Deschamps. Varios años después Gutton y Baissinot patentaron una de las primeras antenas microstrip. Sin embargo, a pesar de la publicación de este concepto, no existió mucha actividad en el desarrollo de antenas microstrip en los siguientes 15 años. Esto se debió en parte a la falta de buenos sustratos para microondas. La necesidad de tener antena más delgadas y adaptables a espacios pequeños para misiles y naves espaciales desencadenó el desarrollo de la antena microstrip en los años setenta.

En su forma más básica, una antena de panel Microstrip consiste en un panel radiando en uno de los lados del sustrato dieléctrico, el cual tiene un plano de tierra en el otro lado, como se muestra en la figura 20. El panel esta hecho generalmente de un material conductor como lo es el cobre o el oro y puede tomar cualquier forma posible. El panel radiador y la línea de alimentación son usualmente foto grabados en el sustrato dieléctrico.

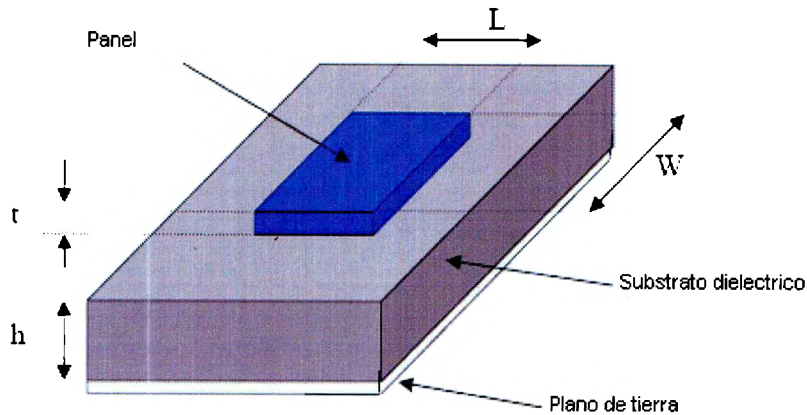


Figura 20. Estructura de una antena de panel Microstrip.

A fin de simplificar el análisis, el panel es generalmente cuadrado, rectangular, circular, triangular, elíptico, o de cualquier otra forma mostrada en la figura 21. Para un panel rectangular, la longitud L del panel es usualmente de $0.3333\lambda_0 < L < 0.5\lambda_0$. La constante dieléctrica del sustrato es típicamente del rango de $2.2 < \epsilon_r < 12$.

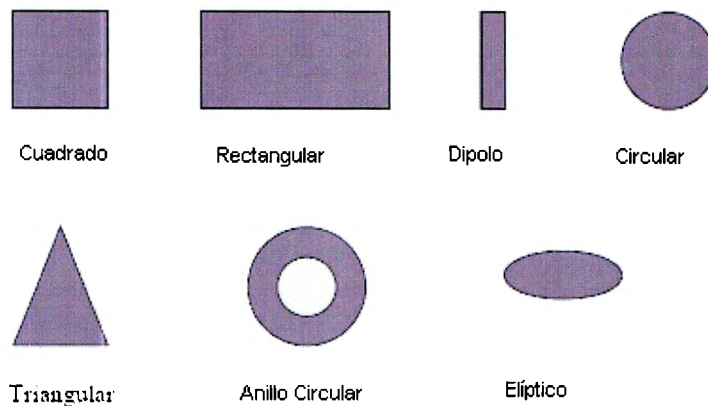


Figura 21. Figuras comunes de elementos del panel microstrip

Las antenas panel Microstrip radian por causa de los campos límite entre el borde del panel y el panel de tierra. Para un buen rendimiento de la antena, es deseable un sustrato dieléctrico delgado con una baja constante dieléctrica, ya que provee mejor eficiencia, mayor ancho de banda y mejor radiación. Sin embargo dicha configuración de antena nos lleva a tener una antena más grande.

5.4.3.2 Ventajas y desventajas.

El interés en las antenas microstrip surge de ciertas características deseables que éstas poseen. La primera de estas características es que son antenas relativamente sencillas de elaborar. Para ciertas aplicaciones, las pequeñas dimensiones de las antenas microstrip permiten que puedan ser incorporadas en espacios reducidos, en vehículos, por ejemplo. Si el sustrato utilizado es flexible, se pueden obtener antenas de formas

mucho más específicas, en lugar de que tengan que sobresalir o tengan que ser depositadas dentro de cavidades especiales. Otra ventaja es lo ligeras que son. Las antenas microstrip son extremadamente baratas en su manufactura. No es necesario maquinar ciertas piezas metálicas. El grabado se realiza con el proceso estándar fotolitográfico. La exactitud de los procesos de grabado asegura la uniformidad de las partes sobre una línea de producción. La producción de grandes cantidades de este tipo de antenas se ha vuelto muy sencilla. Las antenas microstrip se encuentran altamente integradas. La placa del circuito de la antena puede incluir todos los elementos radiantes y toda la red de alimentación. Este tipo de antenas puede ser elaborado sobre el mismo sustrato que otros tipos de circuitería, aumentando aún más su nivel de integración.

Como cualquier otra tecnología, ésta también tiene ciertas desventajas. La mayor de éstas es el ancho de banda tan angosto que posee. El comportamiento de impedancia contra frecuencia que tienen prácticamente todas las antenas de panel microstrip limita su rango de frecuencia de operación. Los factores de calidad Q típicos de los paneles se encuentra alrededor de los 50 a 75. El ancho de banda es una función de Q y del desacoplamiento aceptable. Definiendo el ancho de banda como el rango de frecuencias sobre el cual la razón de onda estacionaria es de 2.00:1 o menos, los anchos de banda de los paneles microstrip son de 1% a 5%. Desde luego el ancho de banda también es función del mal acoplamiento tolerable por lo que puede variar aún más dependiendo de la aplicación. El factor de calidad de la antena es inversamente proporcional al tamaño de la antena en términos de la longitud de onda. Antenas pequeñas, como son los paneles, inherentemente tiene grandes factores de calidad y anchos de banda mucho más estrechos. Grandes arreglos de antenas microstrip tienen varias desventajas. El angosto ancho de banda de los paneles hace que el diseño sea muy complicado si se desea tener antenas con lóbulos laterales muy pequeños. Ciertas radiaciones parásitas de las líneas de alimentación de microstrip pueden corromper los patrones de radiación. Finalmente, las pérdidas en las líneas de alimentación resultan en relativamente bajas eficiencias.

En resumen algunas de sus ventajas están enlistadas a continuación:

- Peso liviano y poco volumen
- En configuraciones planas el bajo perfil permite que se adecuen a la superficie.
- Bajo costo de fabricación, por lo cual puede ser fabricado en grandes cantidades.
- Soporta polarización lineal y circular.
- Puede ser integrado fácilmente con circuitos integrados de microondas.
- Capacidad para operaciones de doble y triple frecuencia.
- Mecánicamente robusto cuando se monta sobre superficies rígidas.

Entre las desventajas se encuentran:

- Bajo ancho de banda
- Baja eficiencia
- Baja Ganancia
- Excitación de onda superficial.

Las antenas panel Microstrip tiene un factor de calidad muy alto (Q). Q representa las pérdidas asociadas con la antena y un largo Q nos conduce a un ancho de banda bajo y baja eficiencia. La Q puede ser reducida incrementando el grueso del sustrato dieléctrico. Pero cuando el grueso del sustrato crece, una fracción del total de potencia

entregada por la fuente se va hacia la onda de superficie. Esta onda de superficie puede ser contada con una pérdida de potencia no querida ya que es esparcida en la curvatura del dieléctrico y causa degradación en las características de la antena. Otros problemas como la baja ganancia y la baja capacidad de manejo de potencia pueden ser superados usando una configuración de arreglos de elementos.

5.4.3.3 Técnicas de alimentación

Las antenas de panel microstrip pueden ser alimentadas por una variedad de métodos. Estos métodos pueden ser clasificados en dos categorías, de contacto y de no-contacto. En el método de contacto, la potencia de radio frecuencia RF es alimentada directamente al panel radiante usando algún tipo de conductor conectado como puede ser una línea microstrip. En el esquema de no-contacto, se realiza un acoplamiento de campo electromagnético para transferir potencia del elemento de alimentación hacia el panel radiante. Las cuatro técnicas más populares de alimentación que se usan en este tipo de antenas son de línea microstrip, de sonda coaxial (ambos, esquemas de contacto), de acoplamiento por apertura y de acoplamiento por proximidad (ambos, esquemas de no-contacto).

En la técnica de alimentación por línea microstrip, una línea conductora se encuentra conectada directamente al extremo de un panel microstrip como lo muestra la Figura 22. La línea conductora es menos ancha en comparación con el panel. Este tipo de arreglos de alimentación tiene la ventaja de que el conductor puede ser grabado en el mismo sustrato en el que se encuentra el panel, proveyendo una estructura planar.

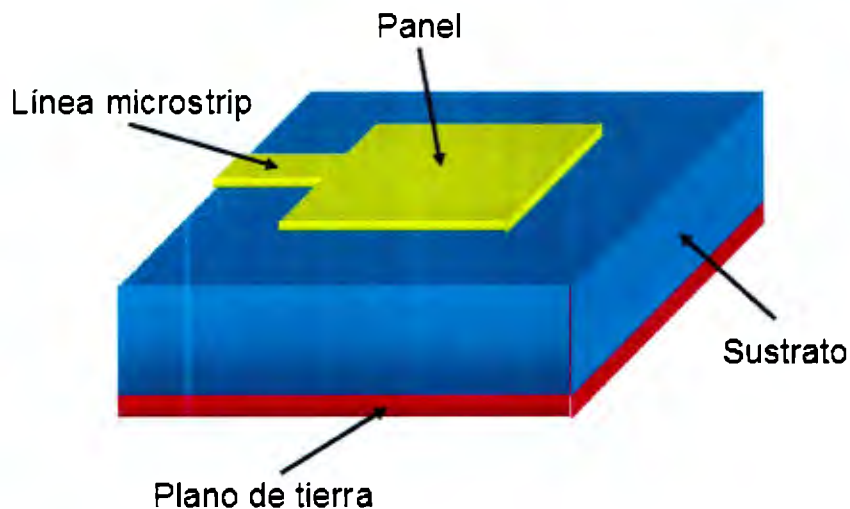


Figura 22. Alimentación de línea microstrip

El propósito de realizar un corte dentro del sustrato y hacia el panel es el poder realizar el acoplamiento de impedancia de la línea de alimentación al panel, sin la necesidad de algún elemento adicional de acoplamiento. Esto se logra al controlar apropiadamente la posición del corte insertado. Estas características hacen de éste, un esquema sencillo de alimentación, ya que provee facilidad de fabricación y simplicidad en el modelado así como un buen acoplamiento de impedancias. Sin embargo, al tener que aumentar el espesor del sustrato dieléctrico para poder hacer las inserciones, las

ondas de la superficie y la falsa radiación también aumentan, y esto afecta el ancho de banda. La radiación de alimentación también lleva a tener una radiación de polarización cruzada indeseable.

La alimentación coaxial o de sonda coaxial es una técnica comúnmente usada para alimentar antenas microstrip. Como se puede observar en la Figura 23, el conductor interno del conector coaxial se extiende a través del dieléctrico y es soldado al panel radiante, mientras que el conductor externo se conecta al plano de tierra.

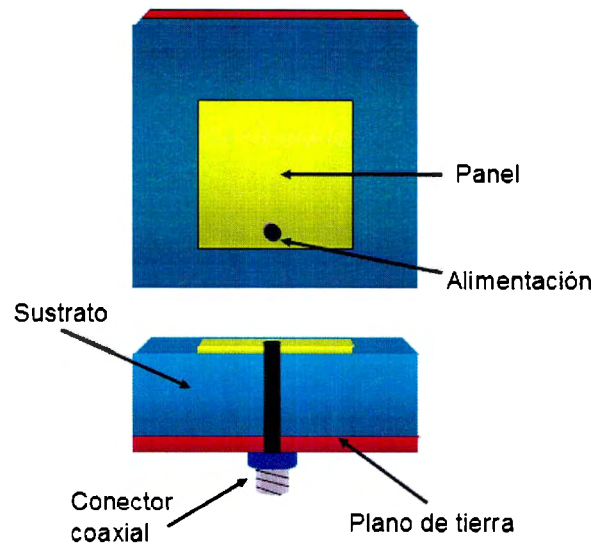


Figura 23. Panel microstrip rectangular con alimentación coaxial

La mayor ventaja de este tipo esquema de alimentación es que la conexión de alimentación puede ser puesta en cualquier punto del panel microstrip de manera que pueda acoplarse a su impedancia de entrada. Este método de alimentación también es muy sencillo de fabricar y tiene baja radiación falsa. Sin embargo, su mayor desventaja es que provoca un ancho de banda muy angosto. Además, si se hace una perforación en el sustrato resulta muy difícil de modelar este tipo de alimentación y, dependiendo del largo del conductor coaxial puede provocar efectos inductivos.

En la alimentación de acoplamiento por apertura, el panel radiante y la línea microstrip de alimentación están separados por el plano de tierra, como se puede observar en la Figura 24. El acoplamiento entre el panel y la línea de alimentación se realiza a través de una ranura o apertura en el plano de tierra.

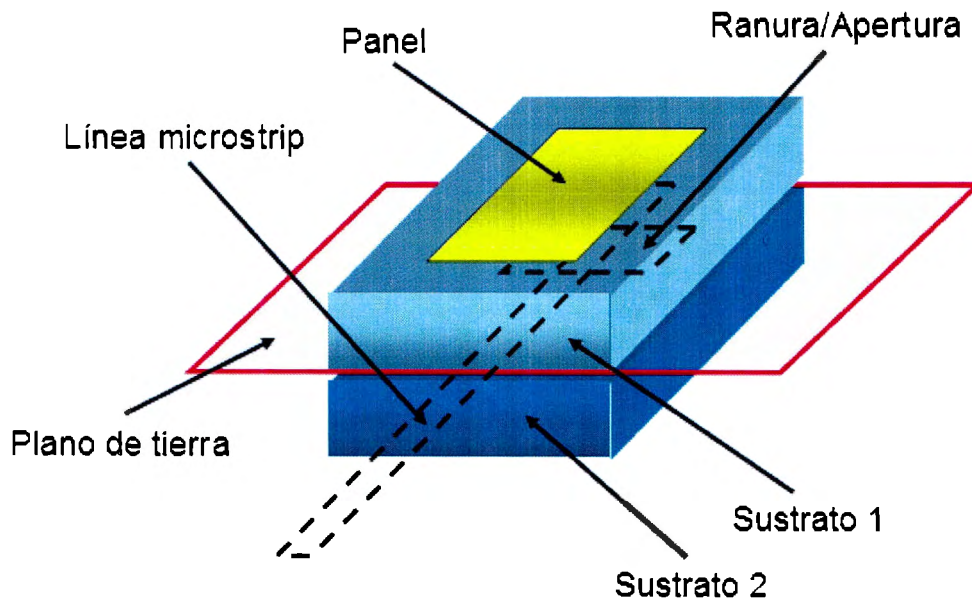


Figura 24. Alimentación de acoplamiento por apertura

La apertura de acoplamiento se encuentra normalmente centrada en el panel, permitiendo que exista menos polarización cruzada debido a la simetría de la configuración. La cantidad del acoplamiento de la línea de alimentación al panel lo determina la forma, el tamaño y la posición de la apertura. Ya que el plano de tierra separa al panel de la línea de transmisión, la radiación falsa es minimizada. Generalmente es utilizado un material altamente dieléctrico para el sustrato inferior, y para el superior se usa un material con baja constante dieléctrica para optimizar la radiación del panel. La mayor desventaja de esta técnica de alimentación es la dificultad de fabricación que impone al tener que usar sustratos múltiples, que además provocan que aumenten las dimensiones de la antena. Este esquema de alimentación también provoca un ancho de banda angosto.

La última técnica de alimentación es la de acoplamiento por proximidad, también conocida como esquema de acoplamiento electromagnético. La Figura 25 muestra dos sustratos dieléctricos entre los cuales se encuentra la línea de alimentación, el panel se encuentra encima del sustrato superior. La principal ventaja de esta técnica es que elimina la radiación falsa de alimentación y provee de un gran ancho de banda debido al aumento del espesor de la estructura de la antena. Este esquema también abre la posibilidad de escoger dos diferentes tipos de sustrato para optimizar el desempeño de la antena.

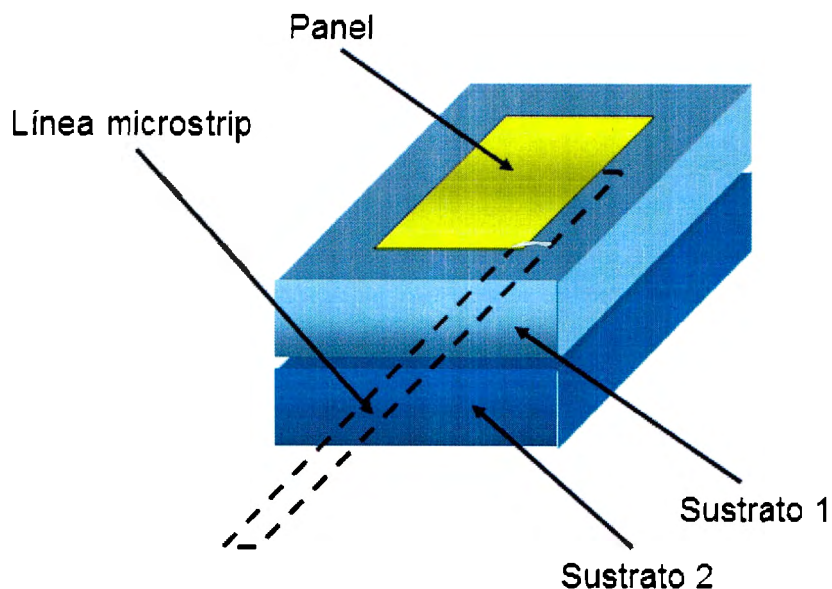


Figura 25. Alimentación de acoplamiento por proximidad

El acoplamiento puede ser alcanzado controlando la longitud de la línea de alimentación y la razón ancho del panel a línea. Su principal desventaja radica en la dificultad de fabricación, de nuevo debido a la necesidad de usar dos sustratos que deben estar bien alineados.

La siguiente tabla resume, a grandes rasgos, las características de las diferentes técnicas de alimentación de manera que sea más sencillo compararlas.

Características	Línea microstrip	Alimentación Coaxial	Acoplamiento por apertura	Acoplamiento por proximidad
<i>Radiación falsa</i>	Alta	Alta	Baja	Mínima
<i>Confiabilidad</i>	Alta	Baja (por soldadura)	Media	Media
<i>Facilidad de fabricación</i>	Sencillo	Necesario soldar y taladrar	Requiere alineamiento	Requiere alineamiento
<i>Acoplamiento de impedancia</i>	Sencillo	Sencillo	Sencillo	Sencillo
<i>Ancho de banda</i>	2-5%	2-5%	2-5%	13%

Tabla 8. Comparación de técnicas de alimentación

5.4.3.4 Polarización circular

Una onda de polarización circular consta de dos componentes de campo ortogonales que se encuentran en cuadratura de fase. Las antenas de panel pero de doble alimentación utilizan dos diferentes fuentes para lograr excitar dos modos resonantes, espaciados y ortogonales y así lograr generar una onda de polarización circular. Es importante para la polarización que los modos tengan la misma amplitud y se encuentren en cuadratura de fase por lo que este tipo de alimentaciones necesitan utilizar una red de alimentación externa que aseguren estas condiciones. Las antenas

microstrip se pueden diseñar de manera que irradien polarización circular sin la necesidad de la red externa y con solo una fuente de alimentación. Para que sea posible excitar los dos modos resonantes necesarios se necesita añadir una pequeña perturbación al panel. Existen varios tipos de perturbaciones que se pueden usar, pero la más común y sencilla de hacer es realizar pequeños cortes de forma triangular en las dos esquinas que se encuentran diagonalmente opuestas. El panel es cuadrado con la excepción de estas dos esquinas y se alimenta exactamente en el centro de uno de sus lados. Si se alimenta del lado que muestra la figura o del lado contrario la polarización se le conoce como circular de la mano derecha RHCP, si se alimenta en uno de los lados adyacentes se le conoce como polarización circular de la mano izquierda LHCP.

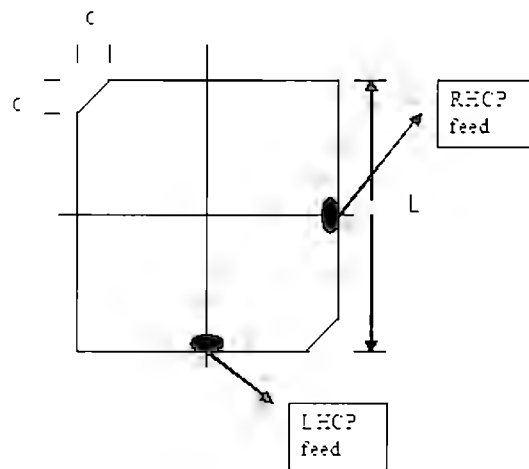


Figura 26. Cortes en panel para polarización circular

La señal que se inyecta por la alimentación, tiende a propagarse en una sola dirección guiada por las líneas de transmisión pero la perturbación lo que hace es dispersar el campo de manera ortogonal. Desde que este modo de dispersión se encuentra con una geometría diferente del panel su frecuencia resonante se ve variada ligeramente. Como se mencionó anteriormente para lograr que sea una polarización circular es necesario que estos dos distintos modos de dispersión tengan que coincidir en amplitud y estar desfasados 90°. La condición de la amplitud se obtiene por el posicionamiento correcto de la alimentación el cual debe ser en el centro del panel. El desfazamiento de 90° se debe a dos factores; el primero es nuevamente el posicionamiento de la alimentación pero ahora con respecto a la orientación de las perturbaciones ya que dependiendo de donde se coloque la alimentación varía el sentido de la polarización y el otro factor es el tamaño de la perturbación.

Existe una relación para poder determinar el tamaño de la perturbación, que depende de las dimensiones del panel y del factor de calidad de la antena.

$$\frac{\Delta s}{S} = \frac{1}{2Q} \quad (33)$$

donde Δs se refiere al área de la perturbación
 S se refiere al área del panel sin la perturbación
 Q se refiere al factor de calidad de la antena

Si la longitud inicial del panel es denotada como L entonces $S = L^2$.

$$c = \sqrt{\Delta s} \quad (34)$$

La medida de “c” es generalmente un octavo de la longitud de uno de los lados del panel.

Las expresiones para las frecuencias resonantes de los nuevos modos se denotan como f_a y f_b y dependen del área de la perturbación.

$$f_a = f_0 \left[1 - \frac{2\Delta s}{S} \right] \quad (35)$$

$$f_b = f_0 \quad (36)$$

donde f_0 se refiere a la frecuencia resonante de la antena sin perturbaciones. Las condiciones para polarización circular se dan en la media aritmética de las frecuencias resonantes.

5.4.3.5 Selección del sustrato (material dieléctrico)

Al diseñar una antena es muy importante seleccionar un sustrato adecuado para nuestras necesidades. Para la selección del mismo es muy importante considerar dos propiedades eléctricas muy importantes: *la constante dieléctrica y la pérdida tangencial*.

El hecho de elegir un material con una constante dieléctrica alta trae como resultado la disminución del ancho de banda. El tener un material con pérdida tangencial alta provoca que la eficiencia de la antena se reduzca y las pérdidas en la alimentación incrementen. Debido a esto lo mejor es seleccionar un material con la constante dieléctrica más baja posible según la aplicación.

El grosor del sustrato se debe elegir lo más grande posible para maximizar el ancho de banda y la eficiencia de la antena, pero siempre teniendo cuidado de que no sea extremadamente grande como para que exista el riesgo de que se excite con ondas de la superficie.

Para una frecuencia de operación máxima f_u , entonces el grosor del sustrato debe satisfacer la siguiente relación:

$$h \leq \frac{0.3c}{2\pi f_u \sqrt{\epsilon_r}} \quad (37)$$

donde c se refiere a la velocidad de la luz, $3 \times 10^8 \text{ m/s}$, y ϵ_r es la constante dieléctrica. Es muy importante que si se busca que el sistema trabaje dentro de una banda angosta de frecuencias la estabilidad de la constante dieléctrica es muy importante.

Las propiedades físicas del material como rango de temperatura a la que opera, coeficiente de expansión térmico, conductividad térmica y flexibilidad o rigidez se

deben considerar de acuerdo a los requerimientos del sistema. Finalmente una consideración de las más importantes que hay que tomar en cuenta son la relación de costo y desempeño del material.

Las antenas de panel diseñadas para trabajar a frecuencias de microondas utilizan substratos como oxido de aluminio, cuarzo y PTFE (politetrafluoretileno) debido a que estos materiales ofrecen un desempeño eléctrico excelente pero por otro lado son muy costosos como para aplicaciones comerciales. El vidrio epóxico (FR4) es un material muy usado para aplicaciones de baja frecuencia, su bajo costo y su fácil procesamiento son sus principales virtudes, pero por otro lado su alta pérdida tangencial (0.01) y su relativamente variable constante dieléctrica (4.4) limita su uso para frecuencias debajo de 1 GHz.

5.4.4. Antenas microstrip en diferentes configuraciones geométricas

5.4.4.1. Antenas microstrip rectangulares

La forma rectangular y cuadrada fue la primera en ser usada y también es la que más se utiliza. La antena es excitada en algún punto a lo largo de la dimensión resonante L , para generar un modo (flujo de corriente) en esta dirección. En general la longitud del panel controla la frecuencia resonante así como el ancho de banda. Para un panel rectangular, mientras más largo es, más pequeña es la impedancia de entrada de la antena, aunque sólo es cierto para algunas condiciones (con un material dieléctrico delgado). Cuando el grosor del material dieléctrico crece a un valor mayor que $0.03 \lambda_0$, este tipo de relaciones dejan de ser mutuamente excluyentes y la técnica de alimentación puede modificar dramáticamente las mediciones del desempeño de la antena.

En general, de todas las geometrías posibles la rectangular tiende a proporcionar el mayor ancho de banda de impedancia, simplemente porque las antenas con esta forma son más grandes que las demás.

Un panel rectangular está definido por su longitud L y su ancho W . Para una línea microstrip simple, el ancho es mucho más chico que la longitud de onda. Sin embargo, para las antenas microstrip rectangulares, el ancho es comparable a la longitud de onda para mejorar la radiación en los bordes. Ya que el grosor del sustrato es mucho menor que la longitud de onda la antena microstrip rectangular se considera como una configuración planar de dos dimensiones.

Para el modo fundamental TM_{10} la longitud L debe ser ligeramente menos que $\lambda/2$, donde λ es la longitud de onda en el medio dieléctrico. Aquí, λ es igual a $\lambda_0 / \sqrt{\epsilon_e}$ donde λ_0 es igual a la longitud de onda en el espacio libre y ϵ_e es la constante dieléctrica efectiva del panel. El valor de ϵ_e es ligeramente menor que ϵ_r porque los campos de frontera alrededor de la periferia del panel no están confinados al sustrato dieléctrico sino que se esparcen en el aire como lo muestra la Figura 27.

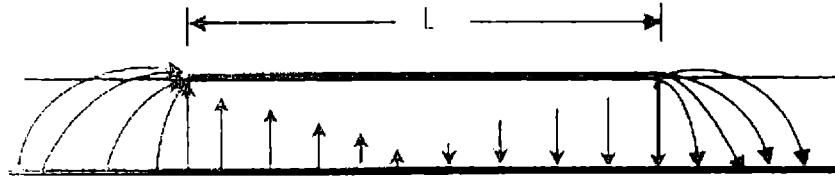


Figura 27. Distribución del campo eléctrico

La expresión para calcular el valor de ϵ_c está dada por la siguiente fórmula

$$\epsilon_c = \frac{(\epsilon_r + 1)}{2} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} \left[1 + \frac{10h}{W} \right]^{-1/2} \quad (38)$$

El modo fundamental TM_{10} implica que el campo varía un ciclo de $\lambda/2$ a lo largo de la longitud, y que no existe variación a lo largo del ancho del panel. La variación de *voltaje* V alrededor de la periferia y la *corriente* I a lo largo de la longitud se muestra en la Figura 28. A lo largo del ancho del panel el voltaje es máximo y la corriente es mínima debido a extremo abierto. Se puede observar de la Figura 27 que los componentes verticales del *campo eléctrico* en los dos bordes a lo largo del ancho se encuentran en direcciones opuestas y por lo tanto se cancelan el uno al otro en la dirección resonante, mientras que las componentes horizontales se encuentran en la misma dirección y por lo tanto se combinan en la dirección resonante. Es por esto que los bordes a lo largo del ancho se les denomina como los bordes radiantes. Los campos de frontera a lo largo del ancho pueden ser modelados como dos franjas radiantes como lo muestra la Figura 29.

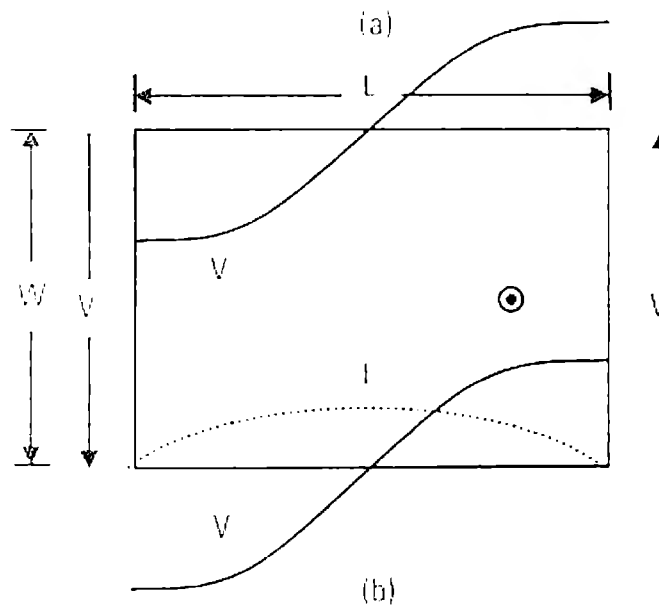


Figura 28. Variación de voltaje y corriente

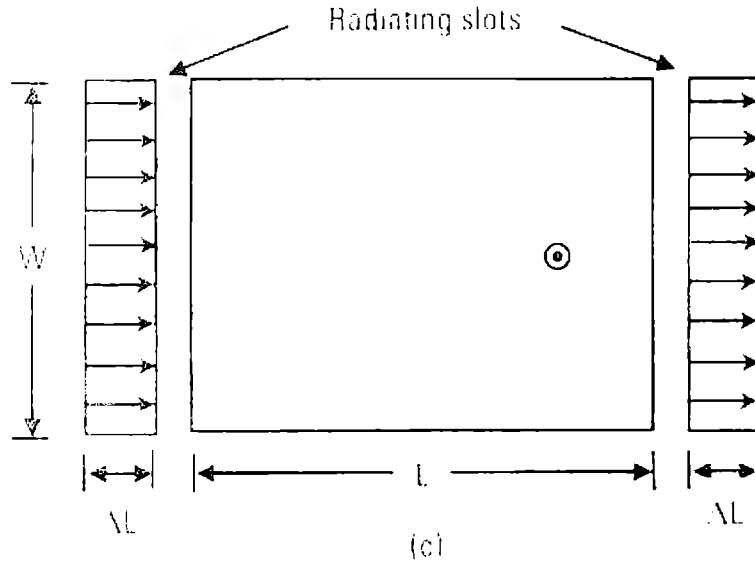


Figura 29. Dos franjas radiantes

Una antena microstrip rectangular operando en el modo TM_{10} puede ser visualizada como una línea de transmisión porque el campo es uniforme a lo largo del ancho y varía sinusoidalmente a lo largo de la longitud. Los campos de frontera en los bordes y la radiación de las franjas se pueden modelar por su capacitancia equivalente y resistencia de radiación como lo muestra la Figura 30.

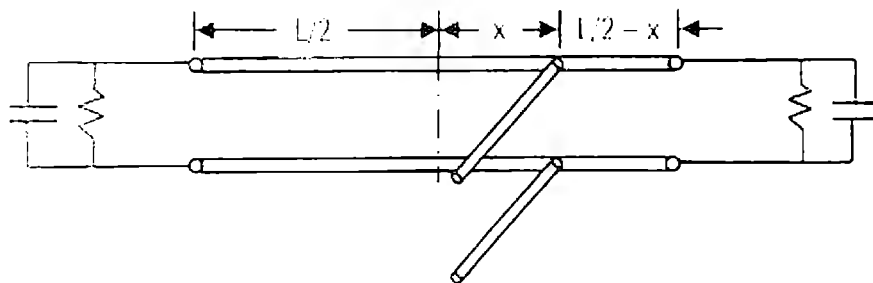


Figura 30. Modelo equivalente de transmisión

En lo que respecta a los campos de frontera en lugar de añadir el capacitor en los bordes, las dimensiones alrededor de la periferia del panel pueden ser extendidas hacia fuera. Esto puede ser explicado en términos de dos placas rectangulares paralelas de dimensiones L y W , separadas por un sustrato dieléctrico de grosor h . Debido a la capacitancia de frontera, la capacitancia efectiva C_e de los dos platos paralelos se incrementa. Una de las formas para tomar en cuenta la capacitancia de frontera es extender las dimensiones de los platos, por lo que el valor C_e puede ser calculado de:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{W_e L_e}{h} \quad (39)$$

donde L_e y W_e son las dimensiones efectivas del panel y son iguales a:

$$L_e = L + 2\Delta L \quad (40)$$

$$W_e = W + 2\Delta W \quad (41)$$

Para antenas microstrip rectangulares generalmente $W \gg h$ así que la extensión en longitud puede ser aproximada por la siguiente fórmula:

$$\Delta L = \frac{h}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (42)$$

Ya que la longitud efectiva del panel es igual a $\lambda/2$ se puede calcular para una frecuencia resonante f_0 con la siguiente fórmula:

$$L_e = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_e}} = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_e}} \quad (43)$$

donde c es igual a la velocidad de la luz en el espacio libre (3×10^8 m/s).

En general, la frecuencia resonante de una antena microstrip rectangular excitada en cualquier modo TM_{mn} se obtiene utilizando la siguiente expresión.

$$f_0 = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_e}} \left[\left(\frac{m}{L} \right)^2 + \left(\frac{n}{W} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (44)$$

Para el modo fundamental TM_{10} , ya que el voltaje es máximo y la corriente es mínima en los bordes, la impedancia de entrada de una antena microstrip rectangular varía desde 0 en el centro del panel hasta un valor máximo en los bordes que varían. Para obtener acoplamiento de impedancia con una alimentación coaxial (generalmente de 50Ω) el punto de alimentación debe ser colocado en un sitio donde la impedancia de entrada de la antena sea igual a la impedancia característica de la alimentación.

En lugar de una alimentación coaxial puede ser usada una línea microstrip para excitar la antena. La antena microstrip rectangular puede ser alimentada por una línea microstrip a lo largo de su borde no radiante a una distancia x del centro, como lo muestra la Figura 31a. Sin embargo, si el valor de W es comparable al de L , entonces el modo ortogonal TM_{01} puede llegar a ser excitado. Si la línea microstrip es puesta a lo largo del borde radiante, entonces una línea microstrip incrustada (como lo muestra la Figura 31b), o un transformados de $1/4$ de onda pueden ser usados para transformar la alta impedancia de entrada en el borde del panel a un valor de 50Ω , como lo muestra la Figura 31c.

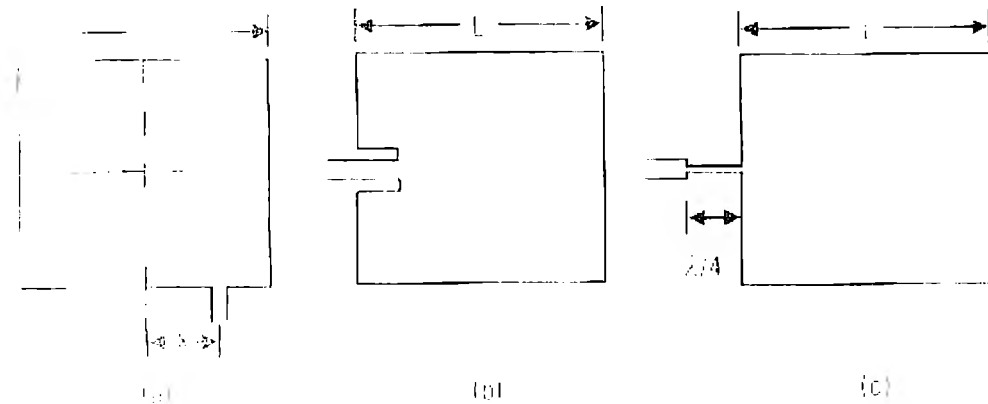


Figura 31. a) línea sobre borde no radiante, b) borde radiante con línea incrustada, c) borde radiante con transformador de cuarto de onda

5.4.4.2 Antenas microstrip circulares

Este tipo de configuración es la segunda más usada, después de la rectangular. Los paneles circulares y elípticos son ligeramente más pequeños que su contraparte rectangular y como resultado tienen una ganancia y ancho de banda más pequeños.

El panel circular, al igual que uno cuadrado, sólo tiene un grado de libertad en la geometría del conductor y éste es su radio. Por lo tanto, cambiando el radio se puede controlar la frecuencia resonante del panel circular. Una vez, bajo circunstancias normales, la posición de la alimentación controlará la impedancia de entrada de la antena en la frecuencia resonante.

Una de las principales razones por las que los paneles circulares fueron ampliamente investigados en el pasado es su inherente simetría. Esto permitió hacer uso de análisis con herramientas basadas en técnicas de dominio espectral mucho más eficientes que las que requería las antenas con formas rectangulares. En su momento esto fue un aspecto que inclinó la balanza hacia el uso de los paneles circulares, pero con el desarrollo de nuevas herramientas más poderosas de análisis computacional, los sistemas que incorporan antenas con paneles circulares son cada vez más raras, siendo preferida la forma cuadrada.

Una antena microstrip circular como lo muestra la Figura 32 es una configuración ampliamente utilizada. En el caso de las antenas microstrip rectangulares la variación del campo debajo del panel está definida en términos de funciones de senos y cosenos. Por otro lado, los campos para una antena microstrip circular están definidos en términos de las funciones de Bessel.

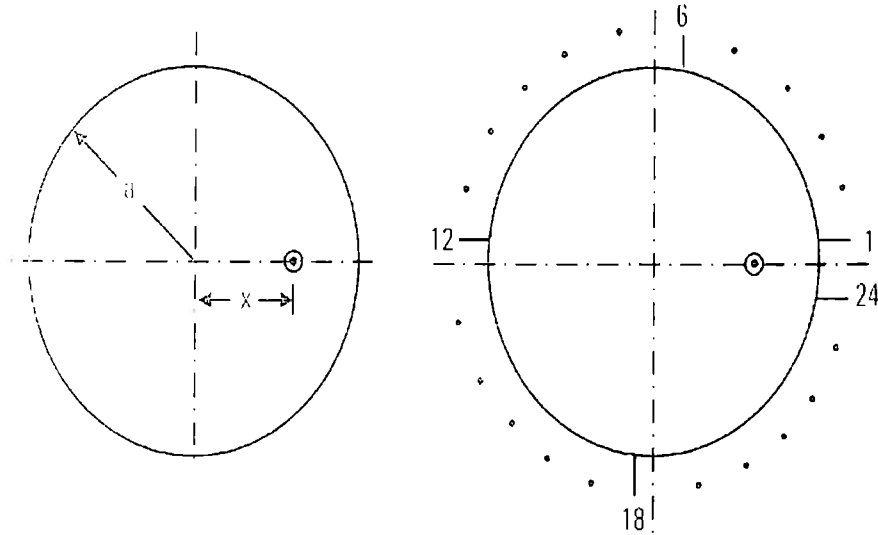


Figura 32. a) Antena microstrip circular, b) modelo multipuerto

La frecuencia de resonancia de una antena microstrip circular se obtiene usando la fórmula

$$f_0 = \frac{K_{nm}c}{2\pi a_e \sqrt{\epsilon_e}} \quad (45)$$

donde K_{nm} es la m -ésima raíz de la derivada de la función de Bessel de orden n .

Para el modo fundamental TM_{11} , el valor de K_{nm} es **1.84118**. El a_e y el ϵ_e son el radio efectivo y la constante dieléctrica efectiva de la antena microstrip circular, respectivamente. Los campos de frontera a lo largo de la circunferencia de la antena microstrip circular son tomados en cuenta al remplazar el radio del panel a por el radio efectivo a_e .

$$a_e = a \left[1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left\{ \ln \left(\frac{a}{2h} \right) + 1.41 \epsilon_r + 1.77 + \frac{h}{a} (0.268 \epsilon_r + 1.65) \right\} \right]^{1/2} \quad (46)$$

El valor de ϵ_e se obtiene usando:

$$\epsilon_e = C(a, h, \epsilon_0 \epsilon_r) / C(a, h, \epsilon_0) \quad (47)$$

donde $C(a, h, \epsilon_0 \epsilon_r)$ y $C(a, h, \epsilon_0)$ son las capacitancias totales del modo dominante TM_{11} de una antena microstrip circular con y sin sustrato dieléctrico, respectivamente. Estos se pueden calcular de la siguiente forma:

$$C(a, h, \epsilon_0 \epsilon_r) = \frac{0.8525 \epsilon_0 \epsilon_r \pi a^2}{h} + 0.5 C_f \quad (48)$$

En la ecuación anterior, el primer término es la capacitancia principal del disco, y el segundo término es la capacitancia de borde, C_f , que está dada por

$$C_f = 2a\epsilon_0 \left[\ln\left(\frac{a}{2h}\right) + 1.41\epsilon_r + 1.77 + \frac{h}{a} (0.268\epsilon_r + 1.65) \right] \quad (49)$$

$C(a, h, \epsilon_0)$ se calcula de sustituir con $\epsilon_r=1$ en las ecuaciones anteriores.

En cuanto a la impedancia de entrada en una antena microstrip circular, para el modo fundamental TM_{11} , ésta es cero en el centro y es máxima en la periferia a lo largo de la línea de alimentación. De forma similar a las antenas microstrip rectangulares, es posible variar esta impedancia hasta hacerla coincidir con el valor deseado de la alimentación si la posición de esta es variada.

En cuanto a la distribución de voltaje, éste tiene una variación de un ciclo de $\lambda/2$ a lo largo de media circunferencia así como a lo largo del diámetro, lo cual indica la excitación del modo TM_{11} .

5.4.4.3 Antenas microstrip semicirculares

Una antena microstrip semicircular con la mitad del área de una antena circular tiene la misma frecuencia resonante que ésta. La frecuencia resonante de la antena semicircular puede ser calculada de la misma expresión que fue utilizada en la antena circular. Sin embargo, las expresiones para obtener la constante dieléctrica efectiva y el radio efectivo no pueden ser usadas directamente, ya que el área es diferente y el borde recto también contribuye a los campos de frontera y por lo tanto a la radiación. La constante dieléctrica efectiva y la extensión en la periferia de la antena microstrip semicircular son obtenidas de igualar el área de la antena con la de una antena rectangular equivalente. La longitud L de una rectangular se toma igual a al diámetro $2a$ de la antena semicircular, y el ancho W se calcula al asumir que $W = \pi a/4$. Para esta W de la antena rectangular equivalente, se calculan la ϵ_e y la extensión de los bordes de los cuatro lados. Finalmente, el radio efectivo a_e de la antena semicircular se determina al igualar su área con la de la antena rectangular extendida. La explicación anterior puede ser observada en la Figura 33.

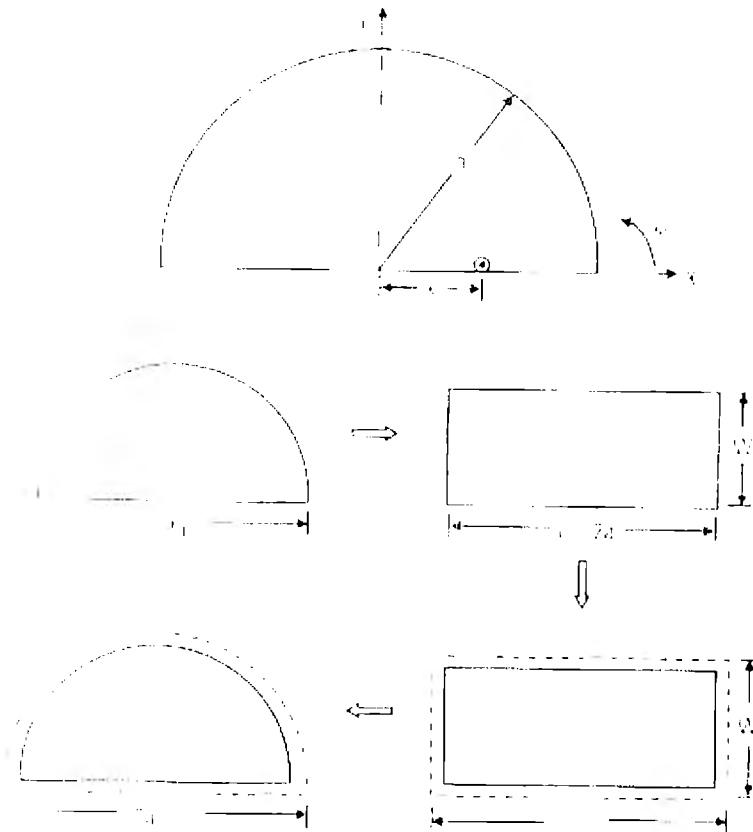


Figura 33. Antena microstrip semicircular y su antena rectangular equivalente

5.4.4.4. Antena microstrip triangular equilátera

Las antenas que poseen panel triangular son aún más pequeñas que las que tienen rectangular o circular, pero con el costo de una mayor reducción de la ganancia y el ancho de banda. Los paneles triangulares también tienden a producir mayores niveles de polarización cruzada, debido a su falta de simetría en su configuración. Para las antenas de sector de disco, si se excitan en su primer modo, la frecuencia resonante la determina el radio, mientras que el arco regula el ancho de banda y la impedancia.

Dependiendo del aspecto del triángulo, frecuencia dual o polarización circular pueden ser obtenidas, aunque el ancho de banda suele ser muy angosto.

Una antena microstrip triangular de lados iguales, o equilátera se muestra en la Figura 34. La frecuencia de resonancia está dada por la expresión:

$$f_{mnl} = f_{mn} = \frac{2c(m^2 + mn + n^2)^{1/2}}{3S_e \sqrt{\epsilon_e}} \quad (50)$$

donde S_e es la longitud de un costado efectiva, y $m+n+l = 0$. Generalmente sólo se usan los parámetros m y n por simplicidad.

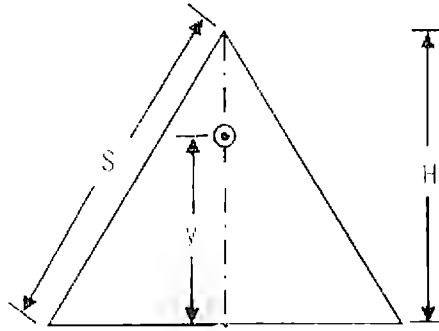


Figura 34. Antena microstrip triangular equilátera

Para un análisis simple, la siguiente fórmula puede ser utilizada:

$$S_e = S + \frac{4h}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (51)$$

donde ϵ_e es obtenida de la siguiente forma:

$$\epsilon_e = \frac{(\epsilon_r + 1)}{2} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} \left[1 + \frac{20h}{S} \right] \quad (52)$$

La variación de la magnitud de voltaje a lo largo de la periferia en una antena triangular equilátera para el modo fundamental TM_{10} se muestra en la Figura 35.

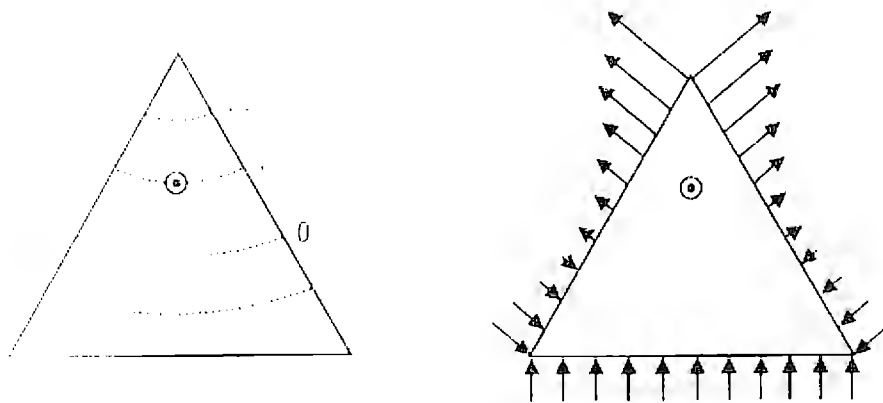


Figura 35. Distribución de voltaje en la periferia de una antena triangular

La impedancia de entrada en una antena de estas características puede ser variada al cambiar la posición de la alimentación a lo largo de una línea que va por el centro del triángulo. El punto donde se obtienen los 50Ω es muy cercano al punto donde la impedancia es nula, que es justamente en el centro de la antena triangular.

5.4.4.5. Antena microstrip triangular 30°-60°-90°

Una antena triangular de ángulos de 30°, 60° y 90° es mostrada en la Figura 36. En este tipo de antena, el área es la mitad de la de una antena triangular equilátera, por lo que también se le llega a dar el nombre de *Antena Triangular Media*. La frecuencia de resonancia de las dos configuraciones es la misma cuando la altura de las dos geometrías es igual, por lo que puede ser obtenida de la misma fórmula.

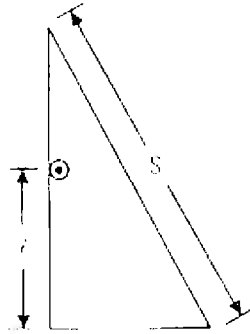


Figura 36. Antena microstrip triangular media

5.4.4.6. Antena microstrip de anillo anular

Las geometrías de anillo son de las más pequeñas formas que existen en los conductores de este tipo de antenas, pero a la vez es necesario sacrificar ganancia y ancho de banda.

El principal problema con esta forma es que resulta complicado lograr una excitación en el modo más bajo y por lo tanto una impedancia de entrada cercana a los 50Ω en la frecuencia de resonancia. De hecho, valores de impedancia desde 150 hasta 250Ω son bastante normales. Para resolver el problema es necesario utilizar técnicas de excitación de no contacto, aunque el precio que se paga es en la eficiencia de la antena.

La forma de anillo tiene un grado de libertad más que la forma circular y por lo tanto su respuesta resulta más fácil de controlar. Se pueden usar las dimensiones tanto del radio interno como del externo para controlar la frecuencia de resonancia, lo cual resulta muy ventajoso. Sin embargo, si el radio interno se aproxima a la dimensión del externo, el ancho de banda de impedancia se vuelve más angosto.

Una antena microstrip de anillo anular es mostrada en la Figura 37. El radio externo se denomina como a mientras que el radio interno es b . A esta configuración se le puede considerar como un círculo al cual se le retira uno más pequeño de su centro.

La frecuencia de resonancia de una antena de anillo anular siempre es más pequeña que la de una antena circular regular, debido a que tiene una longitud resonante mayor.

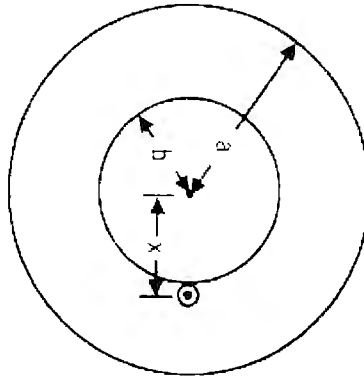


Figura 37. Antena microstrip de anillo anular

5.4.4.7. Comparación de las configuraciones de banda ancha.

La siguiente tabla muestra una comparación de las diferentes configuraciones. Los valores mostrados son reales y tienen la intención de ilustrar las diferencias entre las diferentes geometrías, aunque es importante aclarar que no fueron obtenidos en la práctica, sino que han sido extraídos de referencias bibliográficas.

$(\epsilon_r = 1, h = 0.5 \text{ cm}, \text{ y } d = 0.12 \text{ cm})$

Configuración	Dimensiones [cm]	X o Y [cm]	f_0 [GHz]	BW [MHz]	Ganancia [dB]	Área [cm ²]
Rectangular	$L = 5.2$	1.8	2.602	171	9.8	31.2
	$W = 6.0$					
Circular	$a = 3.0$	1.5	2.663	185	9.7	28.27
Semicircular	$a = 3.0$	1	2.634	120	9.1	14.14
Triangular Equilátera	$S = 6.5$	2.9	2.676	132	9.2	17.42
Triangular Media	$S = 6.5$	2.6	2.595	81	8.9	8.71
Anillo Anular	$a = 2.8$	1.1	2.655	132	9.6	21.48
	$b = 1.0$					

Tabla 9. Comparación de mediciones en diferentes configuraciones

Las dimensiones utilizadas en los experimentos fueron elegidas de tal forma que la frecuencia resonante de las antenas fuera de aproximadamente 2.6 GHz.

La antena rectangular y la antena circular tienen el mayor ancho de banda, pero la antena rectangular tiene mayor ganancia y área.

La antena de anillo anular tiene un área y ancho de banda menor que la antena circular, pero la ganancia es comparable.

Una antena semicircular tiene la mitad del área que una antena circular y tiene un ancho de banda más pequeño, pero su ganancia es sólo ligeramente menor.

Una antena triangular equilátera tiene un ancho de banda y ganancia pequeños pero a cambio tiene un área más chica.

La antena más compacta dentro de estas configuraciones es la triangular media, pero también es la que tiene el ancho de banda más pequeño. Sin embargo, la ganancia sólo es ligeramente menor que en otras configuraciones.

La conclusión de esta comparación es que, si los requerimientos principales de diseño son *ganancia y ancho de banda*, la mejor opción es una *antena microstrip rectangular o una circular*. Sin embargo, si lo que se desea es un *tamaño compacto*, entonces debe ser diseñada una *antena microstrip semicircular o una triangular media*.

5.4.5. Antenas microstrip de banda ancha y polarización circular

En el capítulo pasado se ha discutido sobre antenas microstrip linealmente polarizadas. Sin embargo, existen muchas aplicaciones en las que una polarización circular es deseable. Desde luego, ya se ha asentado previamente que una de estas aplicaciones es la de RFID y lectores de esta tecnología. En aplicaciones como ésta y de sistemas de comunicación que usan polarización circular, la orientación rotacional del transmisor y el receptor se vuelve irrelevante en relación con la potencia de la señal recibida. En cambio, con señales linealmente polarizadas, existiría una recepción muy pobre si la antena del receptor y la del transmisor se encuentran cercanas a ortogonales. Otra característica de la polarización circular es que, después de reflexión en una superficie metálica, el sentido de la polarización se invierte de mano-izquierda (LHCP) a mano-derecha (RHCP) y viceversa permitiendo producir polarización ortogonal. Esto provoca que el sistema pueda discriminar señales reflejadas de otras llegando de caminos directos.

5.4.5.1 Antenas microstrip de polarización circular con doble alimentación

Es posible diseñar una antena microstrip para que tenga polarización circular al excitarla con dos modos ortogonales de iguales magnitudes pero que se encuentren en cuadratura de fase. El signo de la fase relativa es la que determina el sentido de la polarización (LHCP o RHCP).

La forma sencilla es alimentando en dos posiciones ortogonales que tenga señales de $1 \angle 0^\circ$ y $1 \angle 90^\circ$ como lo muestra la Figura 38.

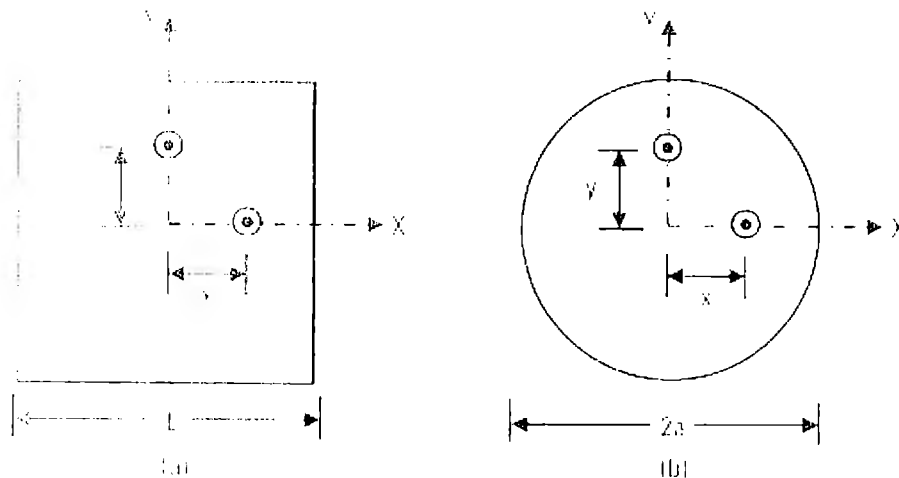


Figura 38. a) Alimentación doble en antena cuadrada, b) en antena circular

Para un panel rectangular operando en su modo fundamental, cuando los dos puntos de alimentación son colocados ortogonales hacia el otro, la impedancia de entrada y frecuencia de resonancia de la antena permanecen sin ninguna afectación, ya que las dos alimentaciones se encuentran en la posición nula del modo ortogonal. Para poder tener una misma potencia con una diferencia de fase de 90° en las alimentaciones se puede utilizar un divisor externo de dos vías 0° y 90° , pero también puede ser integrado dentro de la misma antena.

La ganancia de una antena polarizada circularmente puede ser definida de dos formas. Si la ganancia es medida usando un dipolo que tenga polarización lineal, entonces la potencia recibida será la mitad de lo sería recibido si la transmisión la hiciera una antena polarizada linealmente, y que transmitiera en las mismas condiciones de operación. Sin embargo, si la potencia es medida usando una antena que también esté diseñada para polarización circular, entonces la potencia recibida será mayor en tres 3dB, ya que podrá recibir al mismo tiempo la potencia transmitida por los dos modos ortogonales.

5.4.5.2. Antenas microstrip de polarización circular con alimentación sencilla

En el caso de una antena microstrip de polarización circular con doble alimentación, se requiere implementar un divisor externo de potencia y de diferencia de fase en cuadratura para generar dos modos ortogonales. También existe la alternativa de utilizar una alimentación con una línea de offset o una línea acopladora de 3 dB, pero estas opciones incrementan sensiblemente el tamaño total de la antena.

Para poder sustituir este tipo de alimentación dual, diferentes configuraciones de antena microstrip con alimentación sencilla han sido diseñadas para generar polarización circular. Algunas de las configuraciones de alimentación sencilla para polarización circular que son obtenidas al modificar la geometría del panel de la antena se muestran en la Figura 39. Existe la configuración de alimentación diagonal casi cuadrada, cuadrada con extensiones en los bordes, cuadrada con cortes en los bordes, cuadrada con esquinas truncadas, cuadrada con esquinas cortadas, cuadrada con corte interno

diagonal, entre otras. También existen modificaciones similares para poder obtener polarización circular en antenas microstrip circulares y triangulares.

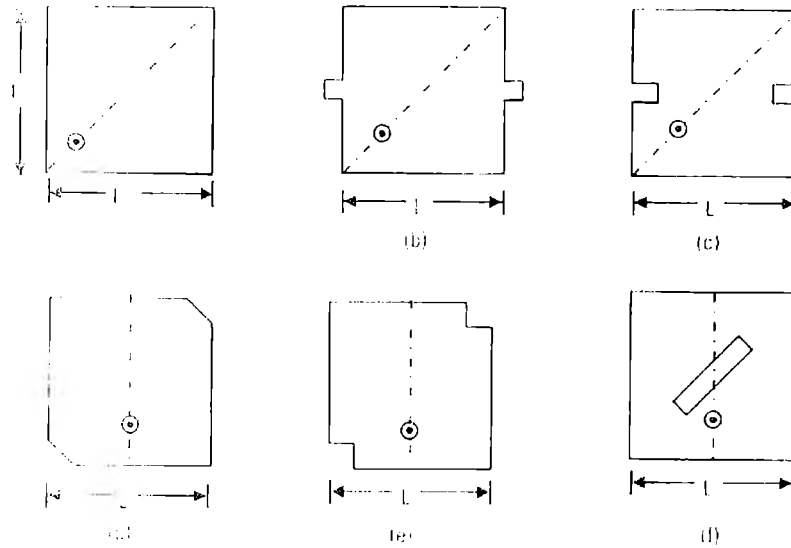


Figura 39. Diferentes configuraciones para polarización circular

Para obtener la polarización circular, es necesario que existan las condiciones que a continuación se describen. Las dimensiones de la antena microstrip se modifican de tal forma que las frecuencias resonantes f_1 y f_2 de los modos ortogonales sean cercanas la una de la otra, como lo muestra la Figura 40.

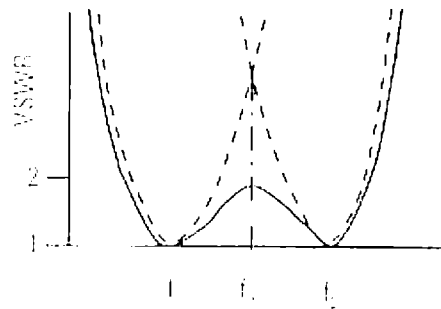


Figura 40. Dos frecuencias ortogonales de banda angosta

La antena es excitada en la frecuencia f_0 que se encuentra entre las dos frecuencias de estos modos ortogonales, de modo que las magnitudes de los dos modos excitados sean iguales. También es necesario que el punto de alimentación se selecciona de tal forma que excite los dos modos ortogonales con una diferencia de fase de $+45^\circ$ y -45° con respecto al punto de alimentación, lo cual resulta en una cuadratura de fase entre los dos modos. Estas dos condiciones son suficientes para generar polarización circular. Si se utiliza un sustrato más grueso con una baja constante dieléctrica, el ancho de banda de la antena será grande, y por lo tanto la separación entre las frecuencias f_1 y f_2 deberá ser mayor, como lo muestra la Figura 41. Sin embargo, la magnitud de los dos modos ortogonales es igual sólo en el punto de f_0 , y por tanto en

ancho de banda de la razón axial es generalmente limitado para este tipo de configuración, aunque el ancho de banda de VSWR sería grande.

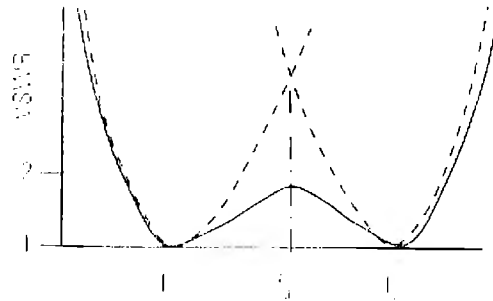


Figura 41. Dos frecuencias ortogonales de banda ancha

5.4.5.3. Antena de alimentación diagonal casi cuadrada

Ésta es una de las configuraciones más sencillas para generar polarización circular. La razón de las dos dimensiones ortogonales L_1/L_2 debe ser generalmente 1.01 y 1.10 dependiendo de los parámetros del sustrato utilizado. Cuando el panel se alimenta en la diagonal, entonces dos modos correspondientes a las longitudes L_1 y L_2 son espacialmente ortogonales. La polarización circular es obtenida en una frecuencia que se encuentra entre estas frecuencias antes mencionadas, como ya se ha dicho, donde tienen iguales magnitud y donde se encuentran en cuadratura de fase.

5.4.5.4. Antena cuadrada con bordes modificados

En lugar de usar una antena alimentada de forma diagonal para generar polarización circular, se puede modificar los bordes del panel al añadir extensiones o al realizar cortes como los muestra la Figura 42.

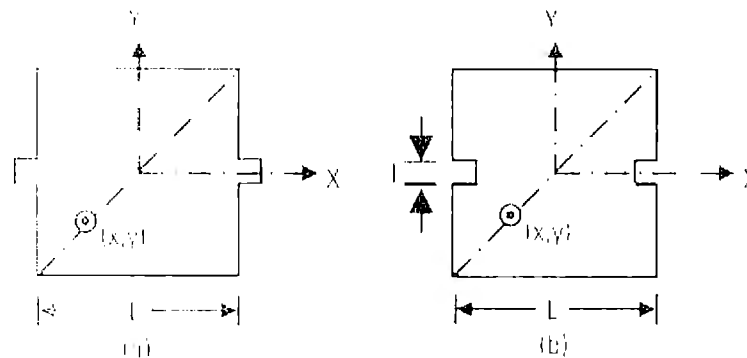


Figura 42. Antenas alimentadas diagonalmente con bordes modificados

Al añadir sólo una extensión o al hacer sólo un corte, también se puede obtener polarización circular, pero entonces la configuración no es simétrica. Sin embargo, mientras que el área efectiva total de las modificaciones sean del mismo orden, la operación de una antena con un solo borde modificado será muy similar a la de una con dos bordes modificados.

5.4.5.1. Antena cuadrada con esquinas modificadas

La polarización circular también puede ser obtenida al modificar las esquinas de una antena microstrip cuadrada. Se pueden remover pequeñas porciones en forma de triángulo isósceles o cuadradas de las esquinas diagonalmente opuestas del panel cuadrado total, como lo muestra la Figura 43.

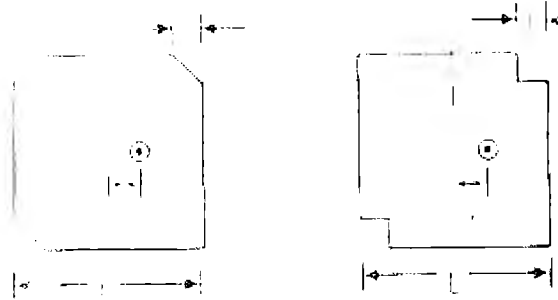


Figura 43. Antenas cuadradas con esquinas truncadas para polarización circular

El hecho de remover las esquinas diagonalmente opuestas hace que la frecuencia de resonancia del modo a lo largo de esta diagonal sea más grande que aquella del modo en la diagonal que no tienen modificaciones. El panel es alimentado a lo largo del eje central y entonces los modos ortogonales son generados. En lugar de trincar las esquinas en alguna forma, también es posible realizar extensiones de pequeñas porciones cuadradas en las esquinas del panel, como lo muestra la Figura 44.

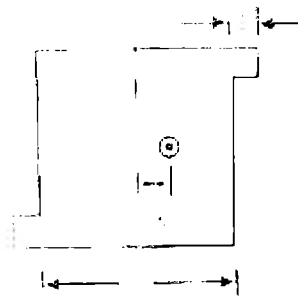


Figura 44. Antena cuadrada con extensiones en las esquinas para polarización circular

5.4.5.6. Antena cuadrada con corte interno diagonal

Una antena microstrip cuadrada con un corte interno diagonal y la alimentación a lo largo de su eje central se muestra en la Figura 45.

La diferencia en las frecuencias de resonancia de los modos ortogonales es causada por el corte diagonal, que hace que las longitudes de las dos diagonales sean desiguales. Las dimensiones del corte las determinará en gran parte las características del sustrato elegido para la antena en cuestión.

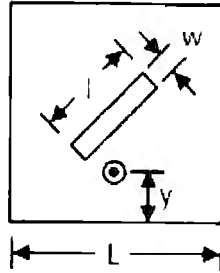


Figura 45. Antena microstrip cuadrada con corte interno diagonal

5.5 Equipo medidor de SWR

Para poder acoplar impedancias, como la de nuestra antena con la del transmisor de Mercury4, una de los parámetros importantes a determinar es el SWR o razón de onda estacionaria. Para poder lograrlo, es necesario contar con un equipo medidor de este factor.

En la siguiente liga se pueden encontrar diferentes páginas de fabricantes de medidor de SWR, incluyendo algunas de las que aparecen en este capítulo.

http://www.dxzone.com/catalog/Manufacturers/SWR_Meters/

A continuación se presenta una tabla comparativa de los distintos productos, así como sus fabricantes.

Producto	Proveedor
8757D Scalar Network Analyzer	Agilent
SX1000 Medidor de Potencia y SWR	Diamond Antenna
PowerMaster Medidor de Potencia y VSWR	Array solutions
SWR 3000 Medidor de SWR	PROCOM Antenas
AWM-30 Wattmetro y SWR	Ameritron

En el anexo 2 se presenta un análisis comparativo de diversos productos y empresas que fabrican este tipo de medidores

6 RESULTADOS

6.1. Diseño de antena panel microstrip.

6.1.1 Especificaciones de diseño.

Los tres parámetros esenciales para el diseño de una antena de panel microstrip rectangular son:

- Frecuencia de operación(f_0): La frecuencia de resonancia de una antena debe ser seleccionada de una forma adecuada. Para aplicaciones RFID en la banda UHF el rango de frecuencias esta entre 900-928 MHz. Por lo tanto el diseño de antena debe ser capaz de operar en el rango de frecuencias mencionado. La frecuencia de resonancia seleccionada para nuestro diseño es de 914 MHz.
- Constante dieléctrica del sustrato (ϵ_r): El material dieléctrico seleccionado para nuestro diseño será espuma de poliestireno expandido el cual tiene una constante dieléctrica de 2.5. Un sustrato con baja constante dieléctrica se ha seleccionado ya que provee mejor eficiencia, mayor ancho de banda y mejor radiación.
- Altura del sustrato dieléctrico (h): Para una antena panel microstrip usada en comunicaciones inalámbricas y en especial en RFID se ha decidido que no este muy abultada, tomando como altura del sustrato dieléctrico 2 cm.

6.1.2 Procedimiento de diseño.

6.1.2.1 Diseño 1

El primer paso para calcular las dimensiones de la antena fue calcular la longitud de onda para la frecuencia deseada.

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} \quad (53)$$

Donde:

λ_0 : Longitud de onda de operación.

c : velocidad de la luz (3×10^8 m/s)

f_0 : 915 MHz

$$\lambda_0 = \frac{3 \times 10^8}{915 \times 10^6} = 0.327869 \quad (54)$$

Para esta longitud de onda estaríamos obteniendo un ancho del sustrato dieléctrico de las siguientes dimensiones:

$$h = \frac{0.3(0.327869)}{2\pi \sqrt{1.00059}} = 0.002491 \quad (55)$$

Donde:

h : La altura del sustrato dieléctrico.

Este ancho del sustrato nos proporcionaba dimensiones extendidas del panel, además de que el manejo de un sustrato más delgado hace la antena menos robusta y manejable. Como se observó en la ecuación 55 el ancho del sustrato originalmente nos arrojaba un valor de casi un centímetro para el valor de frecuencia deseado. Un incremento en el alto del sustrato nos ofrecía características deseables para el diseño, como:

- ⊕ Incremento en la eficiencia. Al incrementar la altura del sustrato existe un incremento en la eficiencia del desempeño de la antena.
- ⊕ Reducción de dimensiones. Si se incrementa la altura del sustrato la razón W/h se reduce, lo que reduce la constante dieléctrica efectiva incrementando la frecuencia de resonancia. Al incrementarse la frecuencia de resonancia hay que reducir las dimensiones para poder mantener los parámetros en los valores de diseño deseados.

Para homologar las características de construcción de la antena se decidió construirlas con un alto del sustrato de 2 cm para de esta manera, poder comparar los parámetros de radiación de las mismas de manera más fácil. Otro punto a favor de este alto del sustrato es que, como se mencionó, ofrece dimensiones más reducidas, incremento de la eficiencia y una antena más robusta y manejable.

Cabe resaltar que tanto el alto como la constante dieléctrica del sustrato son parámetros de diseño importantes, ya que variando éstos podemos obtener distintas dimensiones de la antena, dependiendo de la aplicación para la que sean requeridas. Es muy importante tener en cuenta la relación costo – beneficio que obtendremos cuando reducimos dimensiones, ya que para ciertas aplicaciones bien valdría la pena sacrificar un poco de potencia por una antena más pequeña y robusta, sin embargo, para otras la ganancia es el parámetro de diseño principal, sin importar que la antena sea unos centímetros más grande.

Cálculo del ancho (W): El ancho de la antena de panel microstrip esta dado por la ecuación:

$$W = \frac{c}{2f_0 \left(\sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} \right)} \quad (56)$$

Substituyendo $c=3 \times 10^8$ m/s, $\epsilon_r=2.5$ y $f_0=914$ MHz, obtenemos:

$$W = 12.40 \text{ cm} = .124 \text{ m.}$$

Cálculo de la constante dieléctrica efectiva (ϵ_{reff}): La ecuación que da la constante dieléctrica efectiva es:

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1} \quad (57)$$

Substituyendo $\epsilon_r=2.5$, $W= 12.4\text{cm}$ y $h= 2$ cm, obtenemos:

$$\epsilon_{reff}=2.18$$

Cálculo de la longitud efectiva (L_{eff}): La ecuación siguiente da la longitud efectiva como:

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_o \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (58)$$

Substituyendo $\epsilon_{reff}= 2.18$, $c=3 \times 10^8$ m/s y $f_o= 914$ MHz obtenemos:

$$L_{eff} = 11.11 \text{ cm}$$

Cálculo de la extensión de longitud (ΔL): La ecuación siguiente da la extensión de longitud como:

$$\Delta L = 0.412h \left(\epsilon_{reff} + 0.3 \right) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right) - \left(\epsilon_{reff} - 0.258 \right) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right) \quad (59)$$

Substituyendo $\epsilon_{reff}= 2.18$, $W= 12.4$ cm y $h=2$ cm obtenemos:

$$\Delta L = 9.81 \times 10^{-3}$$

Cálculo de la longitud actual del panel (L): Esta se obtiene de la siguiente forma:

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (60)$$

Substituyendo $L_{eff} = 11.11$ cm y $\Delta L=9.81 \times 10^{-3}$ obtenemos:

$$L = 9.14 \text{ cm}$$

Cálculo de las dimensiones del plano de tierra (L_g y W_g): El modelo de transmisión de línea es aplicable solo a planos de tierra infinitos. Se ha demostrado que se obtienen efectos similares para planos de tierra finitos e infinitos si el tamaño del plano de tierra es mayor que las dimensiones del panel aproximadamente 6 veces el grueso del substrato dieléctrico alrededor de toda la periferia. Por lo cual, las dimensiones del plano de tierra están dadas por:

$$L_g = 6h + L = 6(2\text{cm}) + 9.14 \text{ cm} = 21.4 \text{ cm}$$

$$W_g = 6h + W = 6(2\text{cm}) + 12.40 \text{ cm} = 24.40 \text{ cm}$$

6.1.2.2 Diseño 2

Tamaño del panel (W, L): 139 x 139 mm

Truncamiento (t, t): 30.5 mm

Tamaño del plano de tierra (W, L_1): 234 x 234 mm

Espacio entre el plano de tierra y el panel (h): 20 mm

Tamaño del plano vertical: 30 mm

Material del panel: cobre

Material dieléctrico: aire
Alimentación: BNC coaxial

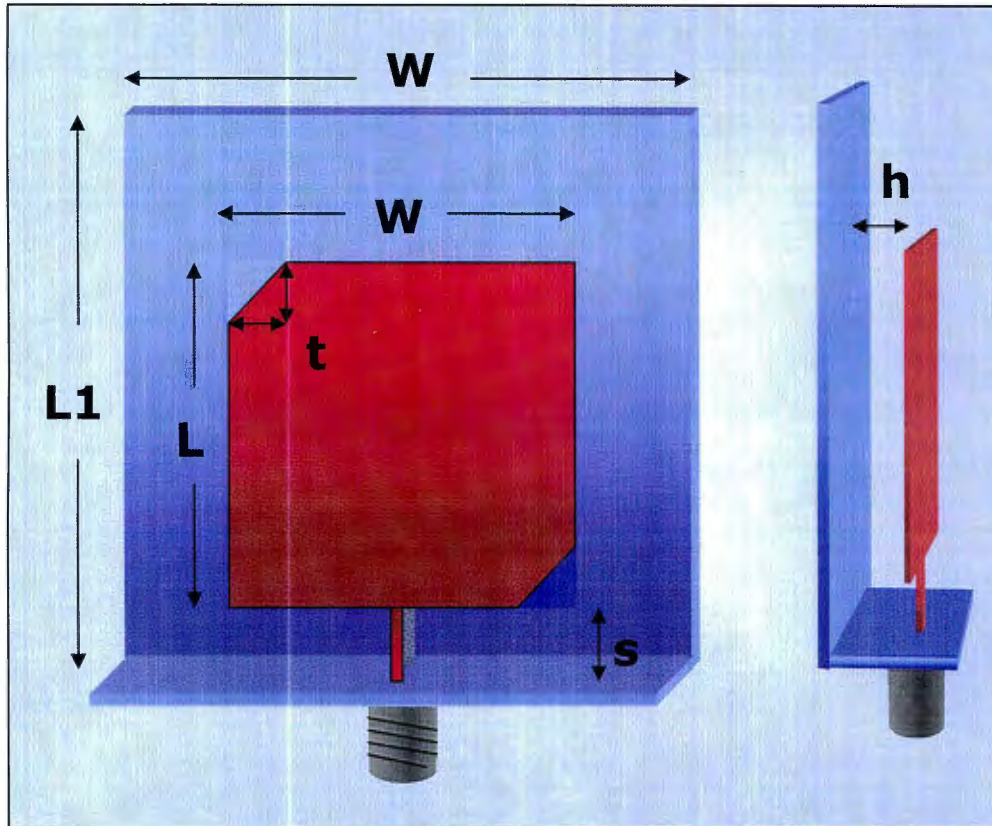


Figura 53. Modelo propuesto de Antena panel

6.1.2.3 Diseño 3

Tamaño del panel (W,L): 93 x 93 mm
Truncacion (t,t): 22.7 mm
Tamaño del plano de tierra (W1,L1): 160 x 160 mm
Espacio entre el plano de tierra y el panel (h): 20 mm
Tamaño del plano vertical: 30 mm
Material del panel: cobre
Material dieléctrico: nylon
Tamaño del dieléctrico: 120 x 120 x 20 mm
Alimentación: BNC coaxial

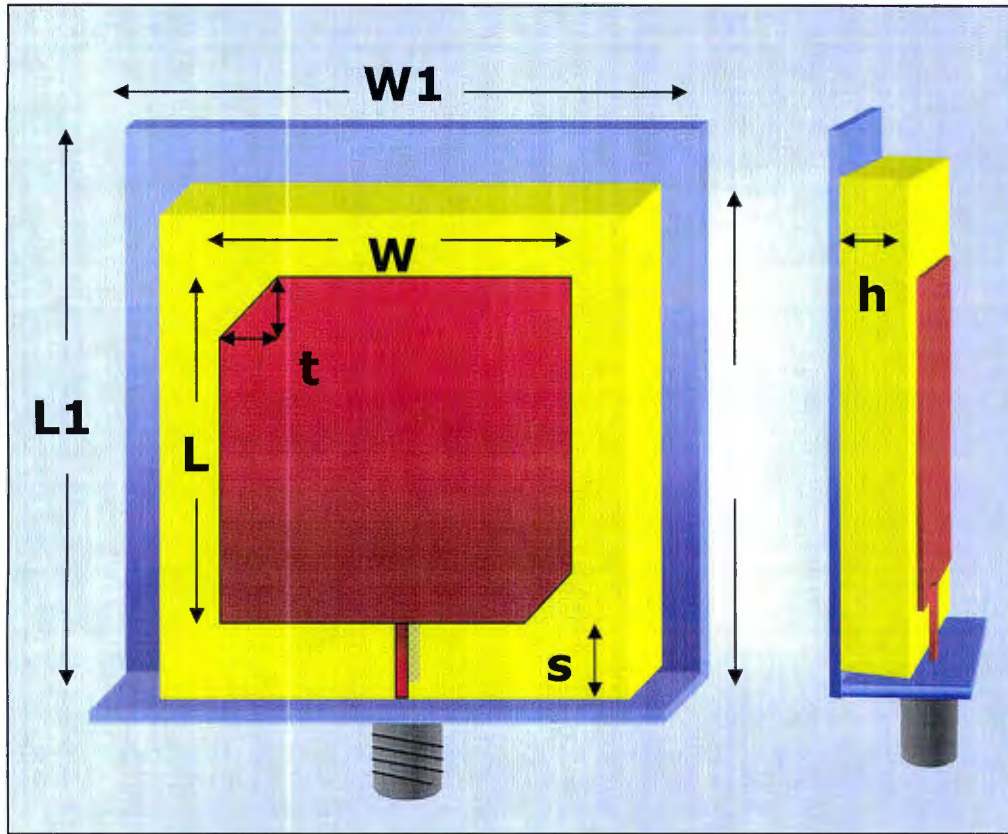


Figura 54. Modelo propuesto de Antena panel

El procedimiento de diseño para la construcción de esta antena es el mismo que para los dos anteriores. Las consideraciones acerca del alto del sustrato y las dimensiones del panel también son las mismas. A continuación se presentan los cálculos realizados para la obtención de las dimensiones físicas de esta antena.

Se toman las ecuaciones 54 y 55 para obtener la longitud de onda, para después, con la ecuación 56 poder calcular el alto del sustrato dieléctrico con la constante dieléctrica del EVA.

$$h = \frac{0.3(0.327869)}{2\pi\sqrt{2.5}} = 0.009527$$

Como lo mencionamos anteriormente la relación entre el ancho del panel y el alto del sustrato se modifica de la siguiente manera.

$$\frac{W}{h1} = \frac{0.1224}{0.02} = 6.12 \quad (61)$$

$$\frac{W}{h2} = \frac{0.1224}{0.00953} = 12.6471 \quad (62)$$

De las ecuaciones 61 y 62 se puede observar como sucede la mencionada reducción de la relación de ancho del panel y alto del sustrato, lo que ocasiona la modificación de otros parámetros de diseño.

$$\varepsilon_e = 0.5[\varepsilon_r + 1 + (\varepsilon_r - 1)G] \quad (63)$$

$$G = (1 + \frac{10h}{W})^{AB} - \frac{\ln 4}{\Pi} \left(\frac{t}{\sqrt{Wh}} \right) \quad (64)$$

$$A = 1 + \frac{1}{49} \ln \left[\frac{(W/h)^4 + (\frac{1}{52} W/h)^2}{(W/h)^4 + 0.432} \right] + \frac{1}{18.7} \ln \left[1 + \left(\frac{W}{18.1h} \right)^3 \right] \quad (65)$$

$$B = 0.564 \exp \left[-\frac{0.2}{(\varepsilon_r + 0.3)} \right] \quad (66)$$

De la ecuaciones 65 y 66 obtenemos que A=1.00558 y B = 0.527626, de lo que se desprenden los siguiente valores para G y la constante dieléctrica efectiva.

$$G = 1.67397$$

$$\varepsilon_e = 3.1$$

$$L_e = \frac{15}{f_0 \sqrt{\varepsilon_e}} = \frac{15}{0.915 \sqrt{3.1}} = 9.31085$$

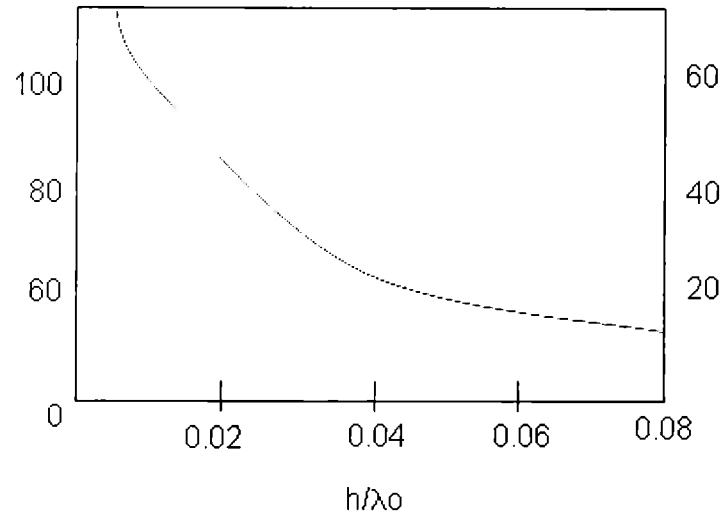
Donde:

L_e = Longitud efectiva del panel.

f_0 = Frecuencia de resonancia en Gigahertz

Cálculo del truncamiento

Para calcular los truncamientos en una antena microstrip rectangular o cuadrada debe de tomarse en cuenta el factor de calidad, que está dado por los parámetros del sustrato como son la constante dieléctrica, el alto del sustrato h y la pérdida tangencial del mismo. La siguiente es una gráfica del factor de calidad Q_0 para una antena microstrip de Largo 9.3 cm y una constante dieléctrica de 2.5.



Nuestra relación h/λ_0 para $h = 2$ cm y $\lambda_0 = 32.78$ cm es de 0.061, lo que de acuerdo a la gráfica nos estaría dando un factor de calidad alrededor de 9. Entonces la longitud del truncamiento puede calcularse de la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta s}{S} Q_o = \frac{1}{2} \quad (67)$$

Siendo Δs el área de la sección truncada (12). Por tanto, con el factor de calidad calculado de la gráfica obtenemos $l = 2.19$ cm, lo cuál fue aproximado a 2.2 centímetros por no contar con herramientas de medición y de corte del material tan precisas.

6.2 Implementación

Para poder hacer la comparación requerida entre las antenas diseñadas fue necesario obtener sus características de radiación. Estas características fueron observadas mediante la obtención de los patrones de radiación correspondientes. Como nuestras antenas fueron diseñadas para contar con polarización circular, los patrones de radiación obtenidos fueron tanto el patrón de radiación horizontal como el vertical para cada uno de los diseños y materiales seleccionados.

Para ser capaces de realizar estas mediciones requerimos un generador de alta frecuencia, un analizador de espectros, el kit de antenas y nuestras antenas. A continuación daremos una breve explicación acerca del equipo necesario para hacer las mencionadas pruebas.

6.2.1 Equipo y material utilizado

Generador de alta frecuencia

El generador de alta frecuencia es un dispositivo utilizado para alimentar la antena con cierta potencia a la frecuencia de operación para la cuál fue diseñada.

Modelo, potencia que le entrega a la antena, características generales del generador. Se estableció un voltaje de generación de señal de 100 mVpp, ya que la antena dipolo utilizada es muy sensible y este voltaje era suficiente para que se realizara la detección.

6.2.2 Diferentes diseños de antenas

Se cuenta con 7 diseños diferentes de antenas, los cuáles se mencionan a continuación:

1. Cobre sin dieléctrico
2. Aluminio sin dieléctrico
3. Acero inoxidable sin dieléctrico
4. Lámina galvanizada sin dieléctrico
5. Cobre con dieléctrico
6. Cobre sin dieléctrico (grosor del sustrato modificado)
7. Lámina con dieléctrico

6.2.3 Procedimiento de Implementación

El procedimiento seguido para la realización de pruebas fue el mismo para todos los diseños.

I. Colocación de las antena

Se colocó la antena dipolo a la misma altura de la antena de p nel.

II. Patrón de radiación horizontal con orientación horizontal

Para obtener el patrón de radiación horizontal con polarización horizontal se fue variando la orientación de la antena de p nel cada 15  hasta completar los 360 .

III. Patrón de radiación horizontal con orientación vertical

Para obtener el patrón de radiación horizontal con polarización vertical se fue variando la orientación de la antena de p nel cada 15  hasta completar los 360 , pero con el dipolo puesto de manera vertical (parado).

IV. Patrón de radiación vertical con polarización horizontal

Para obtener el patrón de radiación vertical con polarización horizontal se coloca el dipolo de manera horizontal y se va moviendo el dipolo alrededor de la antena de p nel de 15 en 15 grados hasta completar los 360.

V. Patrón de radiación vertical con polarización vertical

Para obtener el patrón de radiación vertical con polarización vertical se coloca el dipolo de manera vertical y se va moviendo el dipolo alrededor de la antena diseñada de 15 en 15 grados hasta completar los 360.

VI. Determinación de parámetros en el analizador

En el analizador de espectros la frecuencia de operación se centra a 914 MHz, debido a que nuestras antenas est n diseñadas para esta frecuencia. El ancho de banda fue de 4 MHz totales (SPAN 2MHz).

6.2.4 Patrones de radiación

Antena de cobre sin dieléctrico

La antena de cobre sin dieléctrico fue implementada con el procedimiento descrito en la sección 6.2.3. Las Figuras 55 y 56 muestran imágenes de la implementación de este diseño.



Figura 55. Vista frontal de la antena de cobre sin dieléctrico.



Figura 56. Vista lateral de la antena de cobre sin dieléctrico.

6.2.4.1 Patrón de radiación horizontal con polarización vertical

Como mencionamos anteriormente se necesitaban obtener los diferentes patrones de radiación para los distintos diseños de antenas. La tabla X muestra las mediciones obtenidas en la obtención del patrón de radiación para esta antena.

Tabla de mediciones

Posición [°]	Potencia [dbm]
90	-39.4
75	-34.3
60	-30.9
45	-26.9
30	-24.6
15	-23.1
0	-21.4
345	-22.3
330	-23.8
315	-25.8
300	-27.3
285	-30.5
270	-36.3

255	-33.2
240	-32.9
225	-34.5
210	-35.5
195	-35.3
180	-35.3
165	-35.8
150	-36.2
135	-36.4
120	-37.9
105	-38.4

Tabla 10. Mediciones para el patrón de radiación de la antena de cobre sin dieléctrico.

Gráfica del patrón de radiación

Una vez obtenidas las mediciones, procedimos a la obtención de la gráfica del patrón de radiación horizontal con polarización vertical. Esta gráfica puede observarse en la Figura 57. La gráfica del patrón de radiación es una gráfica radial que muestra la potencia obtenida con diferentes posiciones relativas de la antena y el receptor.

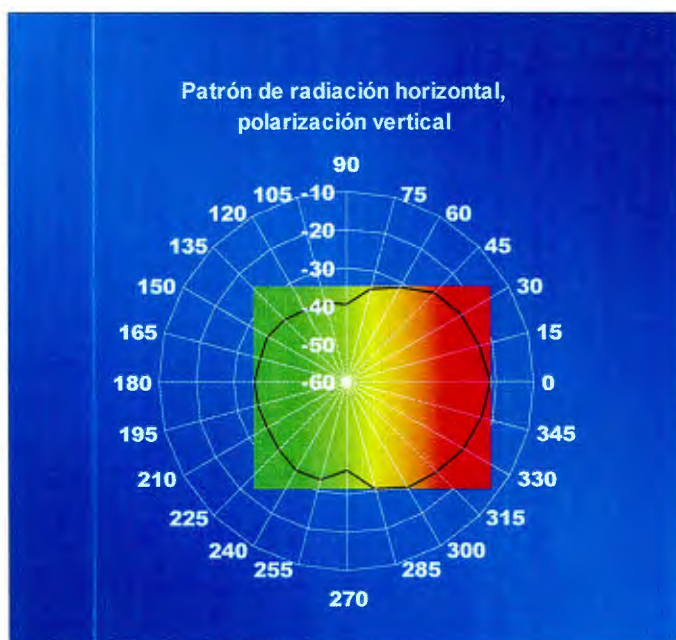


Figura 57. Patrón de radiación horizontal con polarización vertical para la antena de cobre sin dieléctrico.

Frecuencia resonante	915
Fi -3dB	897

Fs -3dB	934
Ancho de banda absoluto	37
Ancho de banda porcentual	4.04

Tabla 11. Parámetros fundamentales del patrón de radiación horizontal con polarización vertical.

Análisis del patrón de radiación

Como se puede observar de la tabla de mediciones, la antena ofrece un nivel de radiación de -21.4 dbm a cero grados, y baja su nivel de emisión de potencia 3dbm cuando la posición de la antena cambia 30° hacia cualquiera de los dos lados. Esto significa que la antena diseñada con este material para las dimensiones propuestas es directiva, ya que la mayor parte de su potencia la dirige en la posición frontal.

Otros parámetros de radiación importantes son los que se pueden observar en la tabla que acompaña al patrón. La frecuencia resonante como se puede observar no es de 915 MHz, frecuencia para la cuál fue diseñada la antena, sino de 810 MHz. Esto se debe a que la antena tiene polarización circular, lo que hace que los diferentes modos tengan una frecuencia de operación diferente y para algunos funcione a una frecuencia más alta o más baja que para otros, según sea el caso.

La frecuencia a la que la potencia baja a -3dB es de 700 MHz, en el límite inferior, y 915 MHz para el límite superior, lo que nos arroja un ancho de banda absoluto de 215 MHz.

6.2.4.2 Patrón de radiación vertical con polarización vertical

Tabla de mediciones

Posición	Potencia dbm
90	-32.2
75	-26.5
60	-25.4
45	-22.7
30	-21.2
15	-19.9
0	-20.6
345	-20.1
330	-22.8
315	-27.4
300	-29.2
285	-32.5
270	-38.6
255	-34.6
240	-34.3
225	-35.4
210	-33.2
195	-31.3

180	-32.3
165	-35.5
150	-36.4
135	-38.5
120	-39.2
105	-37.8

Tabla 12. Mediciones para el patrón de radiación vertical con polarización vertical.

Gráfica del patrón de radiación

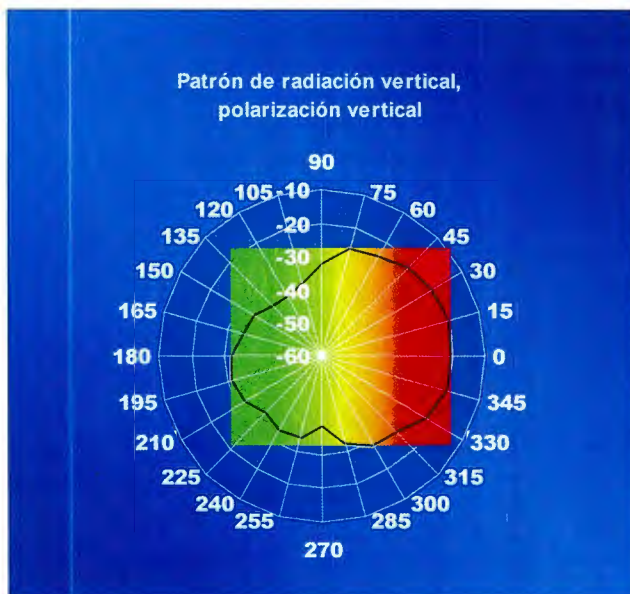


Figura 58. Gráfica del patrón de radiación vertical con polarización vertical.

Frecuencia resonante	915
Fi -3dB	897
Fs -3dB	934
Ancho de banda absoluto	37
Ancho de banda porcentual	4.04

Tabla 13. Parámetros fundamentales obtenidos del patrón de radiación vertical con polarización vertical.

Análisis del patrón de radiación

Para este patrón de radiación se modifica la manera en que movemos la antena de p nel, ya que ésta cambiar  su posición en el plano vertical en lugar de en el plano horizontal. Para una posición de cero grados la potencia de nuestra antena alcanza los -20.6 dBm y esta baja en 3 dB a los 45  en la dirección frontal de movimiento, mientras que se modifica a los 30  en la dirección contraria.

El ancho de banda absoluto y por tanto, los límites superior e inferior de la frecuencia en donde la potencia no baja a más de 3dB son los mismos que para el patrón de radiación anterior.

Como podemos observar, para una polarización vertical con este tipo de antenas tanto en orientación horizontal como en orientación vertical, la potencia radiada por la antena es verdaderamente pequeña en la parte de atrás, es decir, toda la fuente de radiación se emite del panel como es deseado. Para las partes posteriores de ambos patrones la potencia de la antena cae hasta 10 dB en cada caso.

6.2.4.3 Patrón de radiación horizontal con polarización horizontal

Tabla de mediciones

Posición	Potencia dbm
90	-45.2
75	-32.4
60	-25.5
45	-21.5
30	-18.7
15	-18.1
0	-17.9
345	-21.7
330	-26.2
315	-33.7
300	-45.5
285	-40.2
270	-40.2
255	-38.5
240	-37.6
225	-36.2
210	-34.2
195	-32.9
180	-32.7
165	-37.5
150	-39.5
135	-39.5
120	-39.8
105	-44.2

Tabla 14. Mediciones para el patrón de radiación horizontal con polarización horizontal.

Gráfica del patrón de radiación

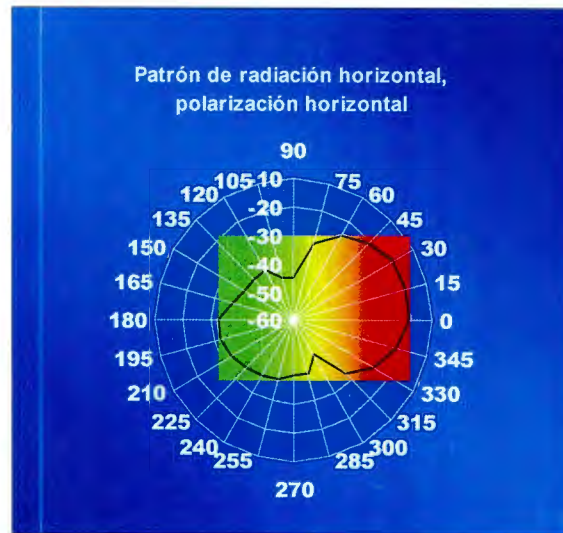


Figura 59. Gráfica del patrón de radiación horizontal con polarización horizontal.

Frecuencia resonante	915
Fi -3dB	901
Fs -3dB	932
Ancho de banda absoluto	31
Ancho de banda porcentual	3.39

Tabla 15. Parámetros fundamentales del patrón de radiación horizontal con polarización horizontal.

Análisis del patrón de radiación

Para este tipo de orientación y polarización la frecuencia es 3dB en una posición frontal que para la polarización vertical. Esto se debe principalmente a que para el dipolo es mucho más fácil captar las ondas radiadas horizontalmente por la antena si está orientado de la misma forma. La potencia en una posición de 0° de la antena de panel respecto del dipolo es de -17.9 dB (3dB mayor que para polarización vertical), y baja a 3dB cuando la antena modifica su posición relativa 45° (rotándola hacia la derecha viéndola de frente), y 15° en el otro sentido. Esto quiere decir que nuestra antena no genera un patrón de radiación completamente simétrico. Se igual forma que para los dos patrones analizados anteriormente, para la parte posterior de la antena, la radiación emitida cae hasta 10 dB con respecto del valor a 0° (completamente de frente).

Con esta polarización obtenemos una frecuencia de resonancia de 925 MHz, por lo que se explicó con anterioridad acerca de los modos en los que se propagan las ondas electromagnéticas. El límite inferior de frecuencia para la cuál la potencia aún no cae 3 dB es de 890 MHz, mientras que el límite superior es de 960 dB, dándonos un ancho de banda absoluto de 70 MHz. De la información comentada anteriormente se puede deducir que para esta polarización y orientación, el diseño de la antena es más preciso, pues su ancho de haz es menor que para la polarización analizada previamente, además de que su potencia es más elevada en una posición frontal.

6.2.4.4. Patrón de radiación vertical con polarización horizontal

Tabla de mediciones

Posición	Potencia dbm
90	-21.3
75	-21.1
60	-20.3
45	-18.8
30	-17.5
15	-16.7
0	-17.8
345	-20.3
330	-22.5
315	-25.8
300	-27.7
285	-29.8
270	-33.4
255	-37.8
240	-35.6
225	-37.5
210	-34.5
195	-33.2
180	-34.5
165	-33.2
150	-30.3
135	-30.2
120	-31.8
105	-26

Tabla 16. Mediciones para el patrón de radiación vertical con polarización horizontal.

Gráfica del patrón de radiación

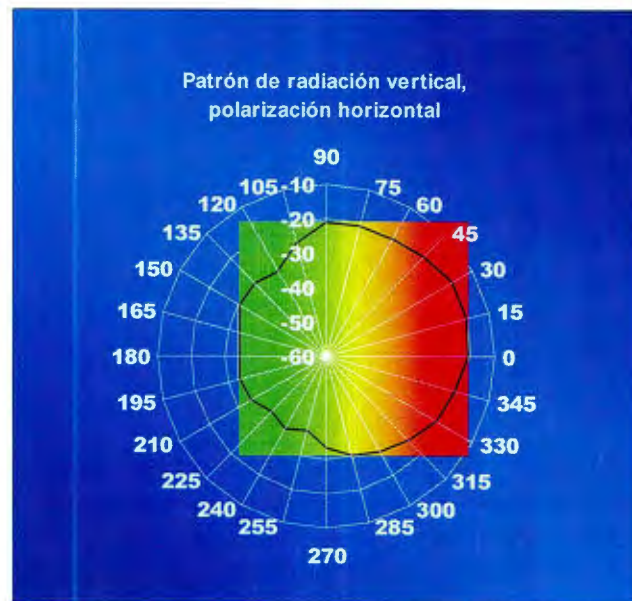


Figura 60. Gráfica del patrón de radiación vertical con polarización horizontal.

Frecuencia resonante	915
Fi -3dB	901
Fs -3dB	932
Ancho de banda absoluto	31
Ancho de banda porcentual	3.39

Tabla 17. Parámetros fundamentales del patrón de radiación vertical con polarización horizontal.

Análisis del patrón de radiación

Para esta orientación con la respectiva polarización se puede observar que la potencia decrece en 3dB cuando la posición se modifica en 60° y sólo en 20° para la rotación de la antena en la dirección contraria. Esto quiere decir que nuestra antena sólo tendrá cierto rango de altura dentro del cual será capaz de leer una etiqueta RFID.

6.2.5 Antena de aluminio sin dieléctrico

6.2.5.1 Patrón de radiación horizontal con polarización vertical

Las Figuras 61 y 62 muestran las imágenes de la antena de aluminio sin dieléctrico implementada en este proyecto.

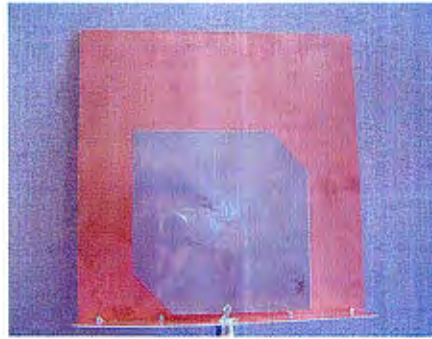


Figura 61. Vista frontal de la antena de aluminio sin dieléctrico.

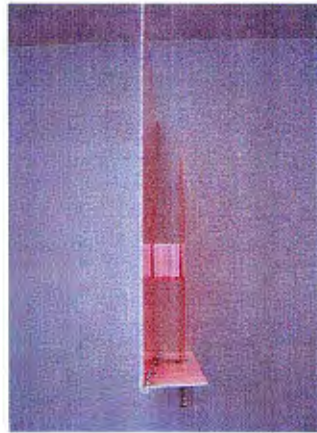


Figura 62. Vista lateral de la antena de aluminio sin dieléctrico.

Tabla de mediciones

Posición	Potencia dbm
90	-50.1
75	-36.7
60	-31.4
45	-27.4
30	-25.3
15	-23.5
0	-21.3
345	-22.7
330	-23.6
315	-26.1
300	-27.4
285	-33.7
270	-48.7
255	-37.5
240	-34.4
225	-37.6
210	-39.4
195	-39.5
180	-43.2
165	-40.2
150	-39.2

135	-40.3
120	-39.8
105	-42.5

Tabla 18. Mediciones del patrón de radiación horizontal con polarización vertical para antena de aluminio sin dieléctrico.

Gráfica del patrón de radiación

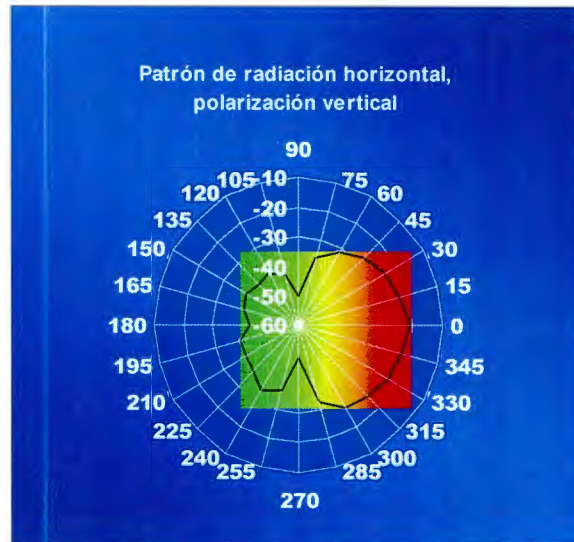


Figura 63. Gráfica del patrón de radiación horizontal con polarización vertical para la antena de aluminio sin dieléctrico.

Frecuencia resonante	915
Fi -3dB	900
Fs -3dB	930
Ancho de banda absoluto	30
Ancho de banda porcentual	3.28

Tabla 19. Parámetros fundamentales del patrón de radiación horizontal con polarización vertical para la antena de aluminio sin dieléctrico.

Análisis del patrón de radiación

El patrón de radiación horizontal con polarización vertical para la antena de aluminio sin dieléctrico proporciona una potencia de -21.3 dB en una posición completamente frontal baja en 3 dB cuando se modifica su posición girándola aproximadamente 20° (a la derecha viéndola de frente), y 35° en la dirección contraria. En cuanto a la frecuencia, su frecuencia resonante es de 820 MHz, y sus límites inferior y superior respectivamente son de 700 y 915 MHz.

6.2.5.2 Patrón de radiación vertical con polarización vertical

Tabla de mediciones

Posición	Potencia dbm
90	-38
75	-32.7
60	-28.9
45	-27.4
30	-26
15	-24.1
0	-23.9
345	-24.2
330	-24.8
315	-27.7
300	-32.2
285	-35.2
270	-45.4
255	-42.3
240	-42.5
225	-43.7
210	-41.5
195	-42.5
180	-39.2
165	-41.3
150	-41.4
135	-39.5
120	-36.4
105	-34.2

Tabla 20. Mediciones para el patrón de radiación vertical con polarización vertical.

Gráfica del patrón de radiación

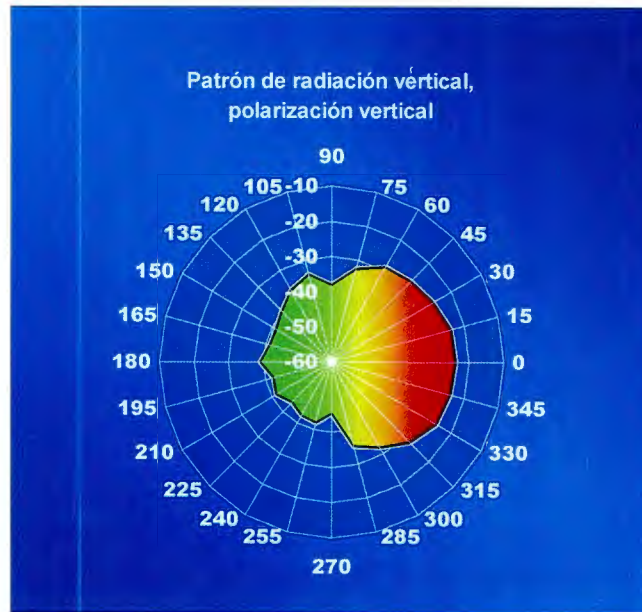


Figura 64. Gráfica del patrón de radiación vertical con polarización vertical para la antena de aluminio sin dieléctrico.

Frecuencia resonante	915
Fi -3dB	900
Fs -3dB	930
Ancho de banda absoluto	30
Ancho de banda porcentual	3.28

Tabla 21. Parámetros fundamentales del patrón de radiación vertical con polarización vertical para la antena de aluminio sin dieléctrico.

Análisis del patrón de radiación

Este patrón de radiación resultó ser más simétrico que el anterior y su potencia decrece en 3 dB si se mueve de su posición original aproximadamente 35° en cualquier dirección. De nuevo se observa que la frecuencia resonante es de 820 MHz, pues este valor es el que se ha venido obteniendo para polarización vertical, y los límites superiores e inferiores de la frecuencia, así como su ancho de banda absoluto tampoco se modifican con respecto de lo obtenido para la antena de cobre.

6.2.5.3 Patrón de radiación horizontal con polarización horizontal

Tabla de mediciones

Posición	Potencia dbm
90	-38.3
75	-28.9
60	-24.9
45	-18.9
30	-17.3
15	-16.1
0	-15.6
345	-16.4
330	-18.5
315	-20.1
300	-26.3
285	-35.7
270	-40.8
255	-37.5
240	-35.8
225	-36.2
210	-35.1
195	-35.4
180	-34.6
165	-33.7
150	-32.4
135	-32.7
120	-33.4
105	-36.6

Tabla 22. Mediciones para el patrón de radiación horizontal con polarización horizontal.

Gráfica del patrón de radiación

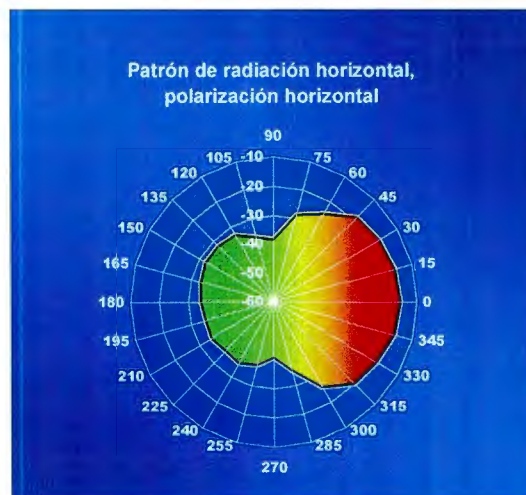


Figura 65. Gráfica del patrón de radiación horizontal con polarización horizontal.

Frecuencia resonante	915
Fi -3dB	905
Fs -3dB	929
Ancho de banda absoluto	24
Ancho de banda porcentual	2.62

Tabla 23. Parámetros fundamentales del patrón de radiación horizontal con polarización horizontal para la antena de aluminio sin dieléctrico.

Análisis del patrón de radiación

De la información obtenida en las mediciones y gráficas para este patrón de radiación pudimos observar que de nuevo la potencia es mayor que para la antena de cobre, ya que para esta polarización y orientación la antena de aluminio arroja un valor de -15.6 dB.

Los valores para los cuáles la potencia cae en 3dB son aproximadamente 42°, rotándola hacia la derecha (viendo la antena de frente) y 30° haciéndola girar en la dirección opuesta. Esto quiere decir que este diseño de antena con aluminio como material de construcción tiene mejores características de radiación en cuanto a potencia se refiere, y de igual modo ofrece un rango un poco más amplio de movimiento sin que afecte tanto la potencia. Sin embargo, esta última característica no siempre es deseable para antenas lectora de RFID, puesto que se necesita que la antena sólo lea a un cierto radio y cierta altura para que el lector/software sea capaz de procesar la información.

La frecuencia resonante para esta orientación y polarización con este material en específico, se ubica justo a la frecuencia requerida por nuestras especificaciones de diseño, es decir, 915 MHz. Los límites inferiores y superiores de frecuencia son 844 y 950 respectivamente, dándonos un ancho de banda efectivo de 106 MHz.

6.2.5.4 Patrón de radiación vertical con polarización horizontal

Tabla de mediciones

Posición	Potencia dbm
90	-23.9
75	-21.4
60	-18.8
45	-17.5
30	-17
15	-16
0	-16.7
345	-17.7
330	-19.7
315	-21.2
300	-23.4

285	-26.2
270	-31.6
255	-31.4
240	-32.7
225	-29.9
210	-31.4
195	-31.8
180	-28.7
165	-29.4
150	-26.4
135	-26.1
120	-25.5
105	-26.4

Tabla 24. Mediciones del patrón de radiación vertical con polarización horizontal para la antena de aluminio sin dieléctrico.

Gráfica del patrón de radiación

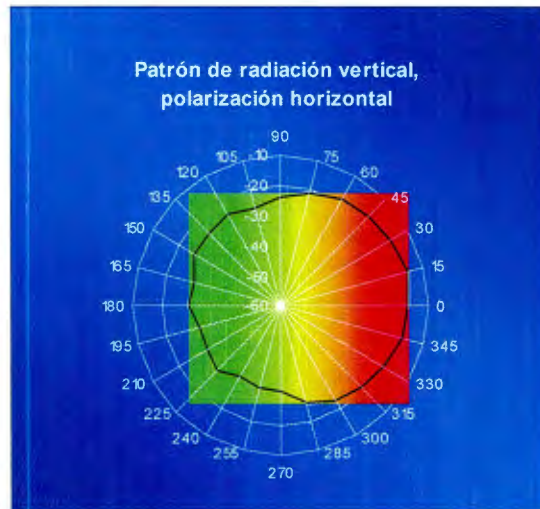


Figura 66. Gráfica del patrón de radiación vertical con polarización horizontal.

Frecuencia resonante	915
Fi -3dB	905
Fs -3dB	929
Ancho de banda absoluto	24
Ancho de banda porcentual	2.62

Tabla 25. Parámetros fundamentales para el patrón de radiación vertical con polarización horizontal para la antena de aluminio sin dieléctrico.

Análisis del patrón de radiación

Esta orientación ofrece menos potencia que para orientación horizontal. Su ancho de banda absoluto asciende a 106 MHz, y los límites superiores e inferiores son 950 y 844 MHz respectivamente.

6.2.6 Antena de acero sin dieléctrico

6.2.6.1 Patrón de radiación horizontal con polarización horizontal

En las figuras 67 y 68 se muestran las imágenes de la implementación de una antena de panel de acero inoxidable sin dieléctrico.

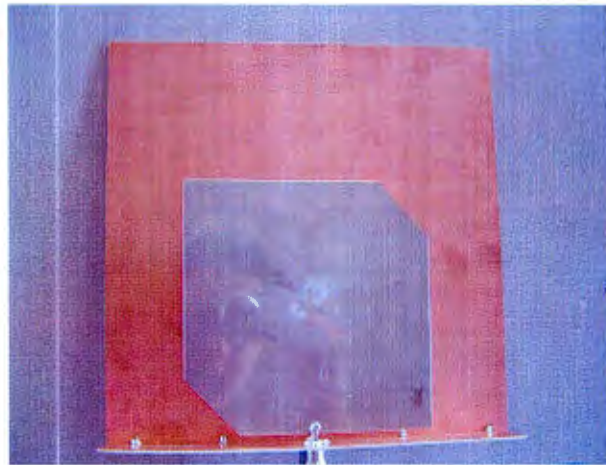


Figura 67. Vista frontal de la antena con panel de acero sin dieléctrico.

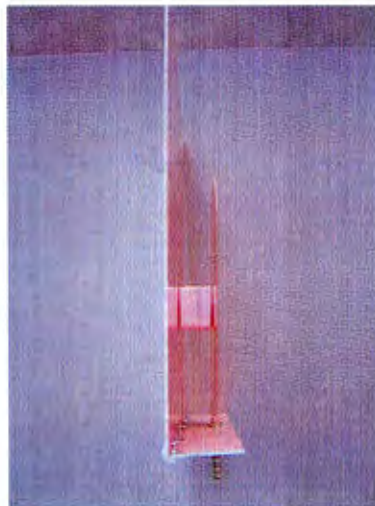


Figura 68. Vista lateral de la antena con panel de acero sin dieléctrico.

Tabla de mediciones

Posición	Potencia dbm
90	-43.6
75	-32.5
60	-25.6
45	-21.5
30	-18.8
15	-18
0	-17.4
345	-19.5
330	-21.7
315	-25.7
300	-35.7
285	-48.9
270	-42.3
255	-41.1
240	-37.9
225	-37.8
210	-35.5
195	-33.5
180	-32.9
165	-34.5
150	-36.6
135	-37.7
120	-40.5
105	-41.5

Tabla 26. Mediciones del patrón de radiación horizontal con polarización horizontal para la antena de panel de acero.

Gráfica del patrón de radiación

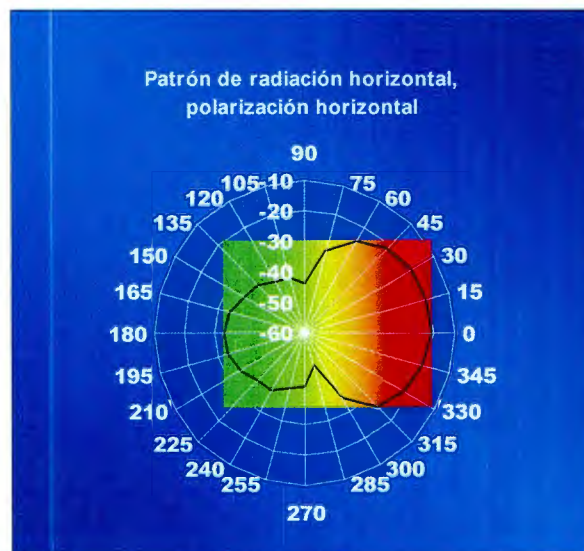


Figura 69. Gráfica del patrón de radiación horizontal con polarización horizontal.

Frecuencia resonante	915
Fi -3dB	908
Fs -3dB	924
Ancho de banda absoluto	16
Ancho de banda porcentual	1.75

Tabla 27. Parámetros fundamentales para el patrón de radiación horizontal con polarización horizontal (antena con panel de acero sin dieléctrico).

Análisis del patrón de radiación

La potencia para esta antena en una posición frontal es de -17.4 dB. Los valores de posición para los cuáles la potencia desciende 3 dB son 35 y 25 grados. La frecuencia de resonancia está a un valor de 820 MHz, valor distinto del cuál se tenía originalmente diseñado por las razones previamente expuestas.

El límite superior de frecuencia para el cual la potencia se mantiene a un nivel relativamente constante es de 880 MHz, y el inferior es de 760 MHz, proporcionándonos un ancho de banda absoluto de 120 MHz.

6.2.6.2 Patrón de radiación vertical con polarización horizontal

Tabla de mediciones

Posición	Potencia dbm
90	-23.4
75	-21.1
60	-18.8
45	-18.2
30	-17.1
15	-17
0	-17.7
345	-18.7
330	-20.5
315	-24.4
300	-27.5
285	-32.6
270	-43.4
255	-39.8
240	-37.7
225	-39.6
210	-35.9
195	-31.3
180	-32.4
165	-33.4
150	-34.6
135	-31.4
120	-33.7
105	-27.7

Tabla 28. Mediciones para el patrón de radiación vertical con polarización horizontal.

Gráfica del patrón de radiación

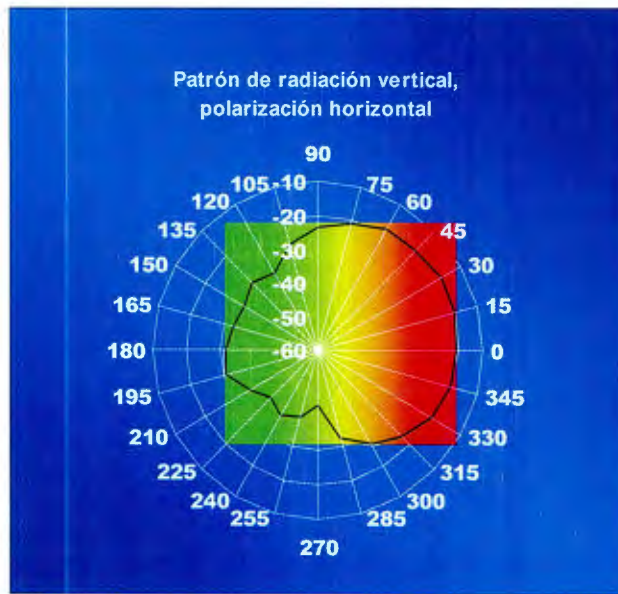


Figura 70. Gráfica del patrón de radiación vertical con polarización horizontal.

Frecuencia resonante	915
Fi -3dB	908
Fs -3dB	924
Ancho de banda absoluto	16
Ancho de banda porcentual	1.75

Tabla 29. Parámetros fundamentales del patrón de radiación vertical con polarización horizontal de la antena de acero.

Análisis del patrón de radiación

Para este patrón se observa que la máxima potencia no está en una posición completamente frontal, sino a 15° (la antena girada hacia la derecha viéndola de frente). A partir de esa posición la potencia decrece 3 dB a 45° hacia cualquiera de los dos lados que se gire la antena.

6.2.6.3 Patrón de radiación horizontal con polarización vertical

Tabla de mediciones

Posición	Potencia dbm
90	-39.8
75	-33.7
60	-30.5
45	-27.8
30	-25.6
15	-24.2
0	-23.1
345	-23.6
330	-25.5
315	-26.7
300	-29.8
285	-30.9
270	-33.5
255	-35.6
240	-39.6
225	-38.7
210	-41.7
195	-39.8
180	-37.7
165	-39.6
150	-44.5
135	-42.5
120	-42.1
105	-38.8

Tabla 30. Mediciones para el patrón de radiación horizontal con polarización vertical de la antena de panel de acero inoxidable.

Gráfica del patrón de radiación

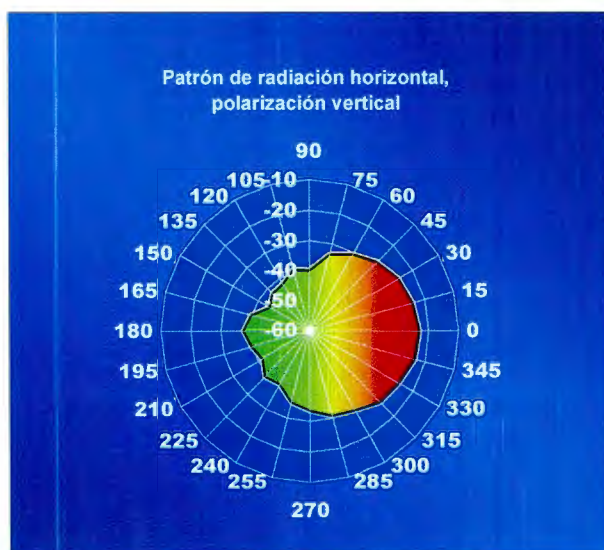


Figura 71. Gráfica del patrón de radiación horizontal con polarización vertical.

Frecuencia resonante	915
Fi -3dB	908
Fs -3dB	927
Ancho de banda absoluto	19
Ancho de banda porcentual	2.08

Tabla 31. Parámetros fundamentales para el patrón de radiación horizontal con polarización vertical.

Análisis del patrón de radiación

Las características del patrón de radiación para este material son muy similares a las de los otros dos materiales, sin embargo, este material presenta menos potencia que en los otros dos materiales.

6.2.6.4 Patrón de radiación vertical con polarización vertical

Tabla de mediciones

Posición	Potencia dbm
90	-42.6
75	-36.6
60	-31.4
45	-27.6
30	-25.7
15	-23.3
0	-23.3
345	-24.8
330	-27.7
315	-29.6
300	-33.4
285	-37.6
270	-39.7
255	-43.2
240	-41.5
225	-36.7
210	-32.7
195	-34.5
180	-32.7
165	-34.6
150	-35.6
135	-41.5
120	-38.6
105	-39.8

Tabla 32. Mediciones para el patrón de radiación vertical con polarización vertical.

Gráfica del patrón de radiación

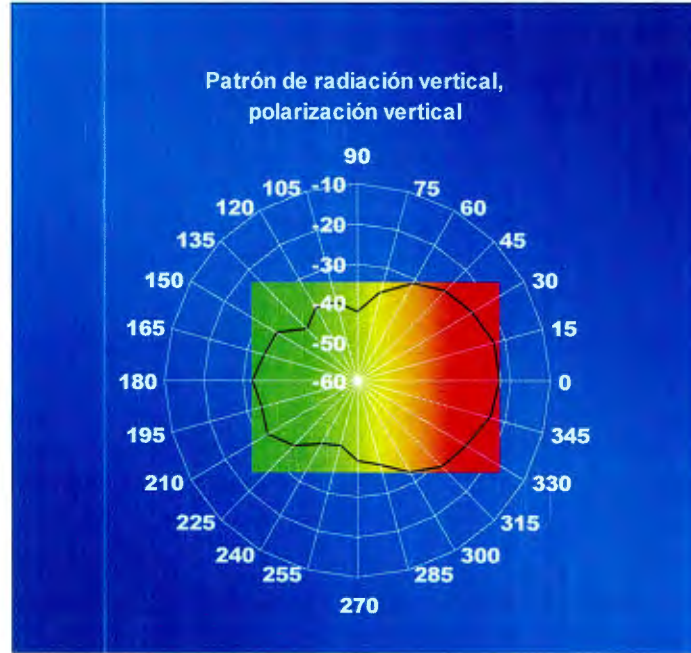


Figura 72. Gráfica para el patrón de radiación vertical con polarización vertical.

Frecuencia resonante	915
Fi -3dB	908
Fs -3dB	927
Ancho de banda absoluto	19
Ancho de banda porcentual	2.08

Tabla 31. Parámetros fundamentales para el patrón de radiación vertical con polarización vertical.

Análisis del patrón de radiación

De la información obtenida en las mediciones y gráficas para este patrón de radiación pudimos observar que la potencia es menor que para las antenas construidas con los otros dos materiales.

6.2.7 Antena de cobre con dieléctrico

6.2.7.1 Patrón de radiación horizontal con polarización vertical

En las Figuras 73 y 74 se muestran las imágenes de la vista frontal y lateral de la antena de panel de cobre con dieléctrico implementada.



Figura 73. Vista frontal de la antena con panel de cobre con sustrato dieléctrico.



Figura 74. Vista lateral de la antena con panel de cobre con sustrato dieléctrico.

Tabla de mediciones

Posición	Potencia dbm
90	-34.7
75	-32.6
60	-31.4
45	-28.3
30	-27.1
15	-24.4
0	-24.9
345	-24.2
330	-24.6
315	-25.9
300	-27.3
285	-29.6
270	-32.6
255	-34.2
240	-35.7
225	-35.3
210	-34.6

195	-33.3
180	-33.7
165	-32.6
150	-33.2
135	-33.8
120	-35.4
105	-37

Tabla 33. Mediciones para el patrón de radiación horizontal con polarización vertical de la antena de cobre con sustrato dieléctrico.

Gráfica de los patrones de radiación

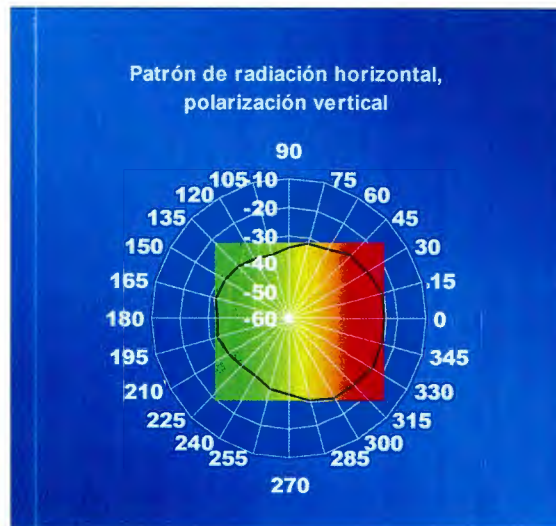


Figura 75. Gráfica del patrón de radiación horizontal con polarización vertical para la antena de cobre con sustrato dieléctrico.

Frecuencia resonante	915
Fi -3dB	911
Fs -3dB	923
Ancho de banda absoluto	12
Ancho de banda porcentual	1.31

Tabla 34. Parámetros fundamentales para el patrón de radiación horizontal con polarización vertical para la antena de cobre con sustrato dieléctrico.

Análisis del patrón de radiación

De la tabla de mediciones se puede observar que la potencia de alimentación de la antena baja un valor de 3 dB cuando se modifica la posición de la antena 30°.

La frecuencia de resonancia para este caso es más alta, de 1150 MHz. El rango de frecuencias para el cuál la potencia de la antena se comporta relativamente estable es de 915 a 1370 MHz, es decir, no baja más de 3 dB. Este último resultado no da un ancho de banda absoluto de 455 MHz.

De igual forma se puede observar que la potencia radiada es siempre hacia el frente, es decir, hacia donde está el panel.

6.2.7.2 Patrón de radiación vertical con polarización vertical

Tabla de mediciones

Posición	Potencia dbm
90	-30.5
75	-28.4
60	-26.3
45	-25.7
30	-24.3
15	-23.5
0	-24.6
345	-23.7
330	-23.9
315	-24.2
300	-24.2
285	-28.1
270	-31.7
255	-32.2
240	-34.5
225	-35.6
210	-31.7
195	-30.4
180	-30.9
165	-33.4
150	-31.6
135	-31.4
120	-36.4
105	-31.5

Tabla 35. Gráfica del patrón de radiación vertical con polarización vertical para la antena con panel de cobre y sustrato dieléctrico.

Gráfica del patrón de radiación

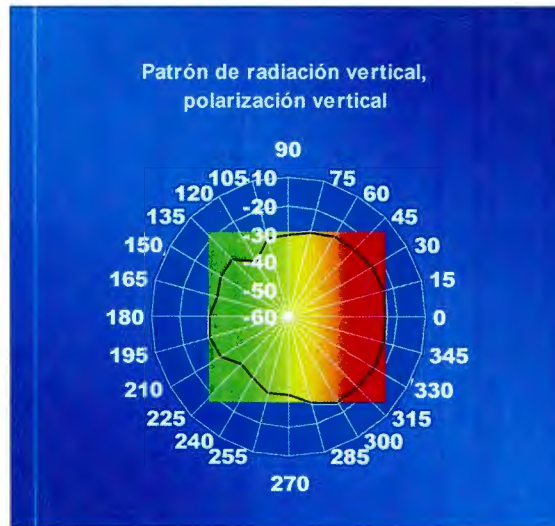


Figura 76. Gráfica del patrón de radiación vertical con polarización vertical.

Frecuencia resonante	915
Fi -3dB	911
Fs -3dB	923
Ancho de banda absoluto	12
Ancho de banda porcentual	1.31

Tabla 36. Parámetros fundamentales del patrón de radiación vertical con polarización vertical.

Análisis del patrón de radiación

Para esta orientación y este tipo de polarización obtenemos menos potencia que para las antenas sin dieléctrico, sin embargo, con este tipo de diseño se pueden reducir las dimensiones tanto del panel como del plano de tierra.

La frecuencia de resonancia es de 1150 MHz. El límite superior de frecuencia para la cual la potencia no cae más de 3 dB es de 1370 MHz, mientras que el límite inferior es de 915 MHz. El ancho de banda absoluto es de 455 MHz, por lo que tenemos una antena que radía de manera más uniforme hacia el lado y hacia el frente.

6.2.7.3 Patrón de radiación horizontal con polarización horizontal

Tabla de mediciones

Posición	Potencia dbm
90	-45.6
75	-41
60	-39.2
45	-37.3
30	-35.2
15	-34.5
0	-33.5
345	-32.5
330	-31.2
315	-30.1
300	-29.5
285	-31.5
270	-34.5
255	-35.6
240	-40.1
225	-39.8
210	-37.8
195	-38.3
180	-39.8
165	-42.1
150	-46.7
135	-45.6
120	-47.7
105	-45.6

Tabla 37. Mediciones para el patrón de radiación horizontal con polarización horizontal para la antena de cobre con dieléctrico.

Gráfica del patrón de radiación



Figura 77. Gráfica del patrón de radiación horizontal con polarización horizontal para la antena de cobre con dieléctrico.

Frecuencia resonante	915
Fi -3dB	909
Fs -3dB	922
Ancho de banda absoluto	13
Ancho de banda porcentual	1.42

Tabla 38. Parámetros fundamentales del patrón de radiación horizontal con polarización horizontal para la antena de panel de cobre con dieléctrico.

Análisis del patrón de radiación

Este patrón de radiación presenta una frecuencia de resonancia de 815 MHz. El ancho de banda absoluto para la gráfica de radiación es de 230 MHz, para el cual el límite inferior de la frecuencia es de 700 MHz, mientras que el límite superior es de 930 MHz.

6.2.7.4 Patrón de radiación vertical con polarización horizontal

Tabla de mediciones

Posición	Potencia dbm
90	-40.5
75	-38.2
60	-37.4
45	-36.7
30	-35.9
15	-35.4
0	-32.5
345	-33.5
330	-33.2
315	-33.5
300	-36.3
285	-42.6
270	-45.7
255	-45.6
240	-45.4
225	-44
210	-43.4
195	-44.6
180	-45.7
165	-44.1
150	-43.4
135	-42.5
120	-41.5
105	-41.2

Tabla 39. Mediciones para el patrón de radiación vertical con polarización horizontal para la antena de cobre con dieléctrico.

Gráfica del patrón de radiación

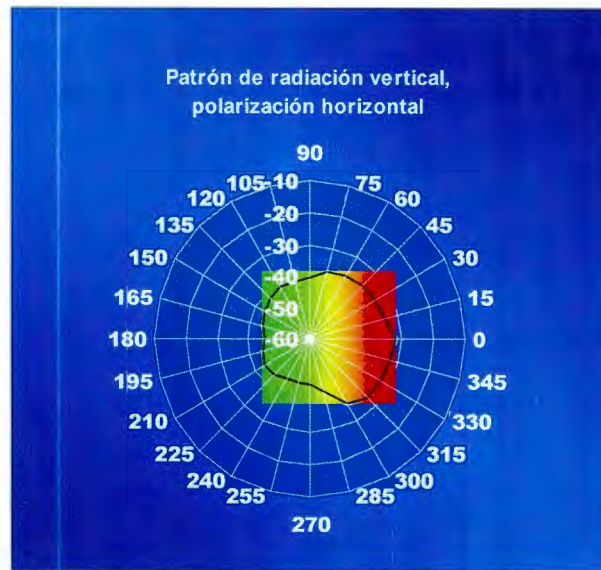


Figura 78. Gráfica del patrón de radiación vertical con polarización horizontal para la antena de cobre con sustrato dieléctrico.

Frecuencia resonante	915
Fi -3dB	909
Fs -3dB	922
13	230
Ancho de banda porcentual	1.42

Tabla 40. Parámetros fundamentales para el patrón de radiación vertical con polarización horizontal para la antena de cobre con sustrato dieléctrico.

Análisis del patrón de radiación

El ancho de banda absoluto para este patrón de radiación es de 230 MHz debido a que el límite inferior de potencia es 700 MHz y el límite superior es de 930 MHz.

6.2.8 Antena de aluminio con polarización lineal

En las figuras 79 y 80 se muestran las imágenes de la implementación de la antena con panel de cobre sin dieléctrico para polarización lineal.



Figura 79. Vista frontal de la antena de cobre sin dieléctrico para polarización lineal.



Figura 80. Vista lateral de la antena de cobre sin dieléctrico para polarización lineal.

6.2.8.1 Patrón de radiación horizontal con polarización horizontal

Tabla de Mediciones

Posición	Potencia dbm
90	-58.7
75	-65.7
60	-61
45	-58.5
30	-50.3
15	-48.8
0	-45.7
345	-45.2
330	-44.6
315	-46.7
300	-44.8
285	-46.7

270	-46.7
255	-53.4
240	-40.5
225	-42.5
210	-48.9
195	-58.8
180	-58.9
165	-52.3
150	-47.8
135	-48.9
120	-51.5
105	-56.7

Tabla 41. Mediciones para el patrón de radiación horizontal y polarización horizontal para la antena de cobre con polarización lineal.

Gráfica del patrón de radiación



Figura 81. Gráfica del patrón de radiación horizontal y polarización horizontal para la antena de cobre para polarización lineal.

Análisis del patrón de radiación

Como se puede observar tanto de la tabla de mediciones como de la gráfica del patrón de radiación para esta orientación con esta potencia no se obtiene potencia en el analizador de espectros. De aquí podemos deducir que esta antena no tiene polarización horizontal, únicamente vertical, como se verá con los siguientes dos patrones.

6.2.8.2 Patrón de radiación horizontal con polarización vertical

Tabla de mediciones

Posición	Potencia dbm
90	-45.8
75	-38.8
60	-34.4
45	-31.2
30	-27.1
15	-24.6
0	-23.8
345	-25.3
330	-27.4
315	-29.8
300	-33.2
285	-36.5
270	-39.8
255	-44.5
240	-48.5
225	-50.2
210	-47.8
195	-49.8
180	-49.7
165	-47.8
150	-49.8
135	-48.8
120	-47.8
105	-43.5

Tabla 42. Mediciones para el patrón de radiación horizontal con polarización vertical.

Gráfica del patrón de radiación



Figura 82. Gráfica del patrón de radiación horizontal con polarización vertical para una antena de cobre sin truncamientos.

Análisis del patrón de radiación

De la tabla de mediciones así como de la gráfica del patrón de radiación podemos observar cómo la potencia recibida por el dipolo se recibe con polarización vertical y no con polarización horizontal.

6.2.8.3 Patrón de radiación vertical con polarización vertical

Tabla de mediciones

Posición	Potencia dbm
90	-33.4
75	-32.7
60	-31.7
45	-29.8
30	-27.3
15	-25.6
0	-25.8
345	-25.2
330	-26.7
315	-27.5
300	-31.6
285	-34.6
270	-37.8
255	-48.9
240	-50.4
225	-50.1
210	-48.9
195	-44.5
180	-42.8
165	-43.6
150	-44.5
135	-45.7
120	-41.2
105	-37.2

Tabla 43. Mediciones para el patrón de radiación vertical con polarización vertical para una antena de cobre sin truncamientos.

Gráfica del patrón de radiación

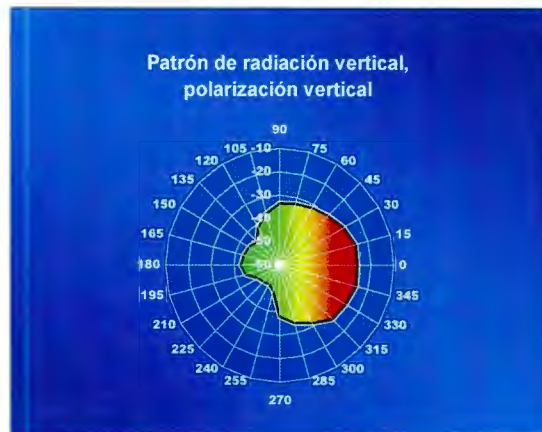


Figura 83. Gráfica del patrón de radiación vertical con polarización vertical para una antena de cobre sin truncamientos.

Análisis del patrón de radiación

Para este patrón de radiación podemos observar de igual forma cómo se tiene una polarización lineal. Su directividad es hacia el frente es hacia el rente y no hacia los lados o hacia atrás.

6.3 Interpretación de resultados

De acuerdo a las características de los patrones de radiación, hemos identificado que material conductor es el que proporciona mejores características para determinado parámetro de la antena

	Cobre	Aluminio	Acero
Ganancia	Segundo	Primero	Tercero
Ancho de banda	Primero	Segundo	Tercero
Ancho del haz	Primero	Segundo	Tercero
Forma del patrón	Segundo	Primero	Tercero

Tabla 44. Comparación de los distintos conductores eléctricos en el panel.

De acuerdo a la tabla anterior y a la investigación bibliográfica de proveedores de antenas decidimos que el mejor material conductor para la implementación con antenas de panel era el cobre.

Las pruebas hechas con la antena con dieléctrico nos permitieron observar el comportamiento de una antena con dimensiones reducidas.

Las pruebas con la antena cuadrada sin truncamientos de polarización lineal nos permitió comprobar la existencia de una polarización circular en las otras antenas.

7 CONCLUSIONES

- El diseño óptimo para antena RFID es la antena patch panel, por sus características de radiación (polarización circular y más sensibilidad que una dipolo o una yagi), su fácil implementación y su costo.
- La geometría más adecuada para el panel de esta antena, por sus características de operación y su facilidad de manufactura es la cuadrada.
- Para aplicaciones RFID es preferible tener polarización circular, que permita acoplamiento con los dispositivos independientemente de la posición de estos.
- Por sus características de operación y facilidad de elaboración, la mejor manera de generar la polarización circular es mediante la alimentación sencilla y con truncamientos en las esquinas del panel.
- De acuerdo a las pruebas de patrones de radiación, tanto el aluminio como el cobre poseen características similares de operación.
- Por investigación de proveedores de equipo RFID, identificamos que el material conductor más común en la fabricación de estas antenas es el cobre.
- El uso de un sustrato dieléctrico permite reducir notablemente las dimensiones de la antena, aunque hemos observado que nuestro diseño tiene pérdidas.
- Creemos que la manera más viable con la que podremos acoplar la impedancia de nuestra antena a la del Mercury4 es con un transformador de cuarto de onda. Pero es necesaria la adquisición de equipo de mediciones.
- El mejor diseño que podemos proponer es una antena microstrip, de panel de cobre cuadrado, de alimentación sencilla con truncamiento diagonal en las esquinas para generar polarización circular.

8 TRABAJO FUTURO

- Ciertos detalles en la finura de la construcción de la antena mejorarán notablemente el desempeño de ésta, como una mejor soldadura entre la alimentación y el panel, entre los planos de tierra, así como los cortes en los materiales.
- Es necesario probar con alimentación coaxial por sonda, ya que puede facilitar el acoplamiento de la impedancia, pero la soldadura es más complicada.
- Falta probar más tipos de dieléctrico para comparar sus efectos en las dimensiones de las antenas y en los anchos de banda de éstas.
- Queda pendiente el diseño de una carcaza que conserve las características de operación de la antena.
- Para lograr obtener una antena verdaderamente competitiva es indispensable el modelado de ésta en una herramienta de simulación electromagnética.
- Quedará pendiente la elaboración de un set de pruebas que involucren al Mercury4 en interacción con esta antena.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Balanis, C. A. Antenna Theory, Análisis and Design. John Wiley & Sons. Nueva York. 1997
2. Cardama, A., Et al. Antenas. Alfaomega. Barcelona. 2000
3. Finkenzeller, K. RFID Handbook: Fundamentals and applications in contactless smartcards and identification, segunda edición, John Wiley & Sons, 2002
4. Fong, K. Microstrip and Printed Antennas. John Wiley & Sons. Nueva York. 1997.
5. Girish, Kumar. Broadband Microstrip Antennas, Artech House, 2003.
6. Ramesh, Garg. Microstrip Antenna Design Handbook. Artech House, 2001.
7. Sainati, R. CAD of Microstrip Antennas for Wireless Applications. Artech House.
8. Shepard, S. Radio Frequency Identification RFID. McGraw Hill. 55-131.
9. Tomasi, W. Sistemas de comunicaciones electrónicas. Prentice Hall. 310-421.
10. Waterhouse, R.B. Microstrip Patch Antennas: a designer's guide. Kluwer Academic Publishers, 2003.
11. World Health Organization, <http://www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/en/index4.html>, 2006, consulta marzo 2006.
12. World Health Organization, <http://www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/en/index3.html>, 2006, consulta marzo 2006.

Diseño e Implementación de Antenas UHF para Lectores

Julio Bracho
Gabriela Pérez
Mauricio Barra
Nahum Hernández



Asesor: Dr. Raúl Crespo
Profesor: Dr. Jorge E. Brieva
Patrocinio: Ing. Jorge



Problemática

RFID es una tecnología que utiliza ondas de radio para identificar automáticamente personas u objetos. La implementación de sistemas RFID es costosa en un país como México, que no cuenta con diseños propios y éstos debe ser importados.

Sistema Propuesto



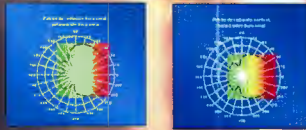
El lector Mercury 4 energiza una etiqueta (tag) usando su antena transmisora. Cuando la etiqueta responde, el lector usará la antena diseñada para recibir las ondas incidentes y poder realizar la lectura.

Resultados

Se realizaron pruebas de radiación usando un generador de alta frecuencia conectado a nuestros diseños, y un analizador de espectros y un dipolo doblado para realizar la medición de potencia radiada. Para cada diseño se obtuvieron 4 patrones de radiación:

- Horizontal en polarización vertical
- Vertical en polarización vertical
- Horizontal en polarización horizontal
- Vertical en polarización horizontal

Patrones de radiación en 2D



Patrones de radiación en 3D



Objetivos del Proyecto

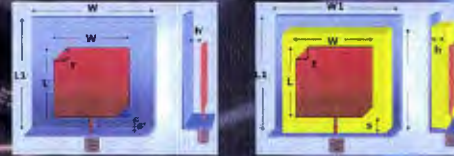
- Determinar el tipo de antena que más se adecua a las características que la tecnología RFID demanda.
- Proponer e implementar diseños para el tipo de antena elegido en la banda UHF de RFID (902 – 928 MHz).
- Determinar cuál de los diseños propuestos es el mejor.

Implementaciones

Se implementaron 7 antenas basadas en dos diseños de antena microstrip cuadrada con truncamientos en las esquinas para polarización circular, con y sin dieléctrico, y usando los siguientes materiales para el panel

- Cobre - Aluminio - Acero Inoxidable

El dieléctrico usado fue el EVA (acetato de vinil etileno) que posee una constante dieléctrica $\epsilon = 2.7$.



Tablas de Análisis de Resultados

Las siguientes tablas muestran las características de operación en antenas microstrip, dependiendo de ciertos parámetros que debimos determinar en el desarrollo del proyecto, como fue la forma y el material usado en el panel conductor. Otros parámetros determinados fueron las dimensiones de la antena, el dieléctrico utilizado y el tipo de alimentación.

Operación según la Geometría del Panel

Geometría	Ancho de Banda	Ganancia	Área
Rectangular	Mayor	Mayor	Mayor
Circular	↑	↑	↑
Recto Angular	↓	↓	↓
Triangular	↓	↓	↓
Esférica	↓	↓	↓
Semicircular	↓	↓	↓
Triangular Invertida	Menor	Menor	Menor

Operación según el material conductor del Panel

Parámetros	Cobre	Aluminio	Acero
Ganancia	Segundo	Primero	Tercero
Ancho de banda	Primero	Segundo	Tercero
Ancho del haz	Primero	Segundo	Tercero
Forma del patrón	Segundo	Primero	Tercero

Conclusiones

Nuestra investigación y pruebas de radiación realizadas demuestra que el diseño óptimo para antena para un lector RFID en la banda UHF es la antena microstrip, de panel de cobre cuadrado, de alimentación sencilla con truncamiento en las esquinas para generar polarización circular.

Se concluye esto tanto por las características de radiación, como por su fácil implementación y bajo costo, que fueron requerimientos indispensables en la realización de este proyecto.

Trabajo Futuro

Modelado de las antenas en una herramienta de simulación electromagnética. Refinamiento en la elaboración de la antena. Elaboración de la carcasa para UHF. Acoplamiento de impedancia entre la antena y la alimentación del equipo Mercury 4.



ANEXO 1. SOFTWARE DE SIMULACION

1. Ansoft Corporation

Empresa: Ansoft Corporation

Calif: 10.0

Página web: <http://www.ansoft.com/products/hf/hfss/>

Contacto: Jim Krasovic <jkrasov1@san.rr.com>

Nombre del software: HFSS v.10

Descripción de fabricante:

HFSS es un Software de Simulación de Campos Electromagnéticos en 3D para Diseño Electrónico de Alto Desempeño.

HFSS Es el software estándar en la industria para extracción SPICE de onda completa y para simulación electromagnética de componentes de alta frecuencia y alta velocidad.

HFSS es ampliamente usado para el diseño de componentes pasivos incrustados sobre chips, PCB's, interconexiones, antenas, componentes de radio frecuencia y microondas, y empaquetamiento de circuitos integrados de alta frecuencia.

HFSS mejora la productividad en procesos de ingeniería, reduce el tiempo de desarrollo, e incrementa la probabilidad de éxito en un primer diseño.

La última versión de HFSS incorpora importantes características que mejoran la productividad para ingenieros de RF y microondas, y expande la capacidad de co-diseño electromagnético a un nuevo segmento de ingenieros que trabajan en las áreas de diseño de circuitos integrados analógicos de RF y multi-gigabit, así como EMI/EMC.

Ejemplos de la interfaz:

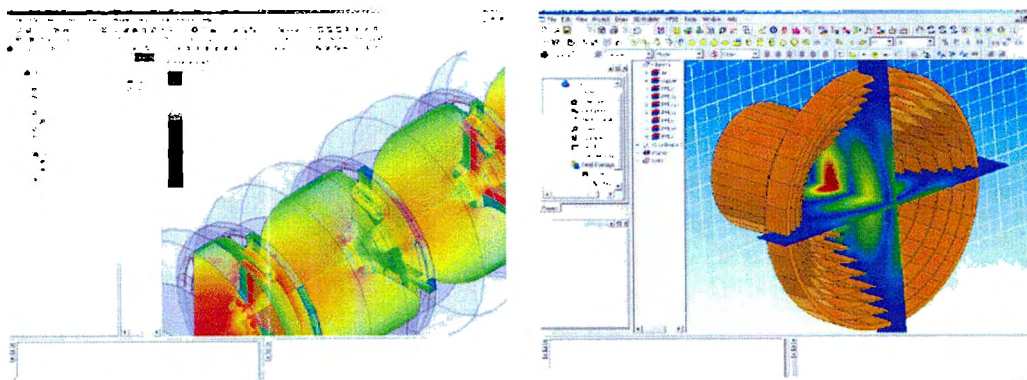


Figura 8. Interfaz del Software de Ansoft

Información de precios (USD):

Precio comercial

HFSS con Optimetrics, Licencia flotante 1 año-

\$67 000

Precio académico

HFSS con Optimetrics, Paquete 5 licencias flotantes 1 año-	\$ 3 858
Ansoft Designer, Paquete 5 licencias flotantes 1 año-	\$ 2 596

Información de apoyo al caso:

Por parte del representante de Ansoft para esta región, recibimos vía correo electrónico una presentación en Power Point sobre un caso de aplicación del software HFSS al diseño de una Antena y un Sistema RFID para la banda UHF, que es exactamente lo que nosotros buscamos lograr en nuestro proyecto.

Evaluación del software:

Hasta el momento éste ha sido el software que más nos ha llamado la atención como herramienta para el diseño de la antena RFID que buscamos realizar. Por la información que hemos obtenido, tanto de la página web, como del representante Ansoft y de algunas otras referencias previas de la empresa, pensamos que HFSS podría ser posiblemente la mejor opción para nuestro diseño en términos de la funcionalidad que éste nos puede brindar. Con la información que obtuvimos del representante en la presentación de Power Point, comprobamos que el software resulta útil para el caso específico que nosotros deseamos desarrollar.

Sin embargo, también encontramos desventajas. La primera y más obvia es la del precio. Éste es un software muy especializado y por lo mismo tiene un precio alto, acorde con el público empresarial al que busca satisfacer. Aún cuando se nos ha ofrecido una tarifa académica para la compra del producto, éste punto tendrá que ser ampliamente evaluado y discutido, sobre todo con nuestro patrocinador. Desde luego, ese es el caso para cualquiera de nuestras opciones, no sólo para ésta.

La segunda desventaja que identificamos es que, debido a la especialización de este producto, podría resultar complicado aprender a usarlo a profundidad, sobre todo en el tiempo que tenemos para hacerlo.

Recientemente, nuestro contacto nos informó que puede proveernos de una Versión de Evaluación del software y Guías de Entrenamiento a finales del mes de marzo. Para poder obtenerla es necesario que le proporcionemos la dirección MAC de alguna computadora que tenga por lo menos 1 GB de memoria RAM, de preferencia 4 GB de RAM.

2. Poynting Group

Empresa: Poynting Group

Calif: 8.5

Página web: <http://www.supernec.com/>

Contacto: Renier Dreyer <supernec@poynting.co.za>

Nombre del software: SuperNec 2.9

Descripción de fabricante:

SuperNec es un Paquete de Simulación Electromagnética de Método de Momentos (MoM) para plataformas Windows o Linux.

La interfase gráfica de usuario 3D es fácil de usar, utiliza ensambles multi-nivel, provee la estructura de ingreso de datos más sencilla y la mejor herramienta de creación de modelos. El visor de resultados provee al ingeniero de diseño toda la información necesaria para un análisis apropiado de la antena, incluyendo características como gráficas de patrones en 2D y 3D, gráficas de tablas smith con marcadores de estilo de analizador de redes, gráficas de acoplamiento y de eficiencia, etc.

El motor de soluciones SuperNec incluye código optimizado para procesadores Intel, varios resolutotes rápidos y una opción de ejecución en paralelo para problemas muy largos. Otra herramienta esencial de diseño es el optimizador de Algoritmo Genético incluido en SuperNec.

Ejemplos de la interfaz:

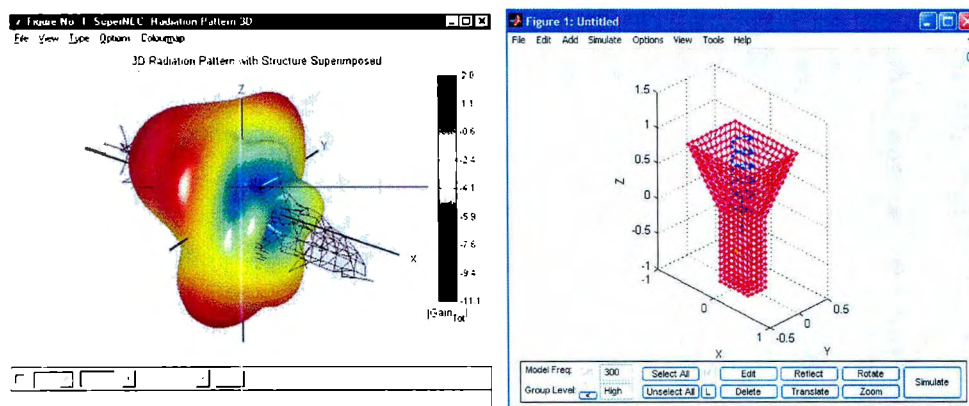


Figura 9. Interfaz del software de Poynting Group.

Información de precios (USD):

<u>Precio comercial</u>	
SuperNec 2.9.-	\$ 6 080
SuperNec Lite.-	\$ 1 120
<u>Precio académico</u>	
SuperNec 2.9.-	\$ 1 330
SuperNec Lite.-	\$ gratis

Información de apoyo al caso:

Sobre este software no tenemos mucha información. Sabemos que la misma empresa que elabora el software también es una empresa que se dedica al diseño de antenas para su distribución comercial y que utilizan SuperNec para ese diseño. Dentro de sus productos manejan algunas antenas para la tecnología RFID.

También sabemos que se encuentra a la venta una Guía de Estudio, para poder aprender a usar todas las funcionalidades del software. Esta guía se puede adquirir en la página de ventas por Internet Amazon.

Evaluación del software:

Este software es una de nuestras opciones más fuertes para ser la elegida como la herramienta de apoyo en este proyecto.

La principal ventaja de este producto es que ofrece una versión “ligera” que para propósito académico es gratuita, y que por tanto ya hemos adquirido. Es decir que, de no optar por otro software más especializado, nosotros ya contamos con éste para realizar las simulaciones. La licencia académica que hemos adquirido tiene una vigencia de 1 año. Esto nos permite conocer mejor el software y nos abre la puerta a poder en un futuro adquirir la versión completa del software, que en su tarifa académica no resulta tan caro como otros de sus competidores.

Otra ventaja de esta opción es la posibilidad de adquirir un manual que nos permita conocer todas sus capacidades y poder usarlo de forma eficiente.

La principal desventaja de SuperNec es que no es una herramienta tan poderosa como otras de nuestras opciones y las opciones de simulación son más reducidas.

3. Flometrics

Empresa: Flometrics

Calif: 9.0

Página web: <http://www.flometrics.com/microstripes/>

Contacto: John Robillard <john.robillard@flometrics.com>

Nombre del software: MicroStripes v.7.0

Descripción de fabricante:

MicroStripes es una Herramienta de Simulación Electromagnética muy veloz y eficiente en uso de memoria que permite y diseño ágil y certero de los más complicados componentes de radio frecuencia, dispositivos de microondas y antenas.

MicroStripes usa una tecnología de resolución moderna y única basada en el método 3D de Modelado de la Línea de Transmisión (TLM) en el dominio del tiempo, que tiene mayor velocidad y eficiencia en comparación a otros métodos más anticuados.

El software tolera cambios rápidos en la densidad de maya ofreciendo un manejo eficiente y permitiendo que los requerimientos de mezclado se mantenidos en un mínimo. Combinando esto con la habilidad de MicroStripes para generar análisis espectral de banda ancha en un solo cálculo, se abren nuevas posibilidades para Ingenieros de diseño.

MicroStripes es usado rutinariamente para diseñar intrincadas estructuras de antena, etiquetas RFID optimizadas, predecir la absorción de ondas electromagnéticas en el tejido humano, sección cruzada de radar (RCS) y EMI/EMP sobre diferentes tipos de vehículos.

Ejemplos de la interfaz:

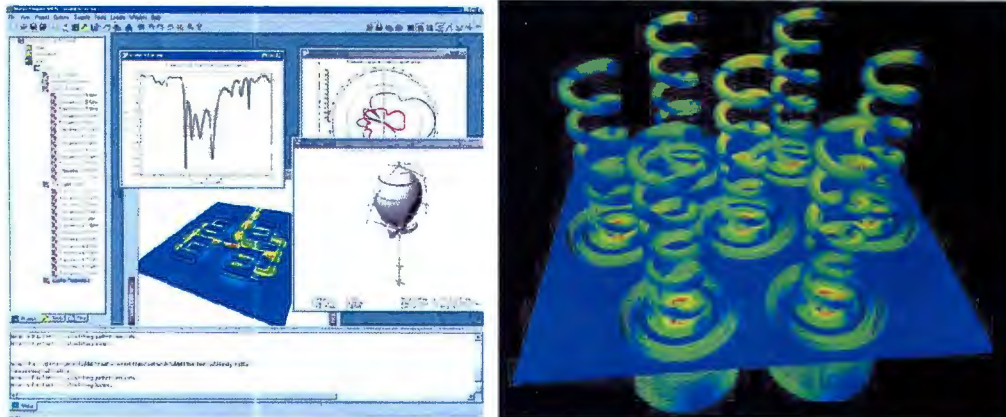


Figura 10. Interfaz del software de Flometrics

Información de precios (USD):

Precio comercial

MicroStripes, Producto.-	\$30 000
MicroStripes, Licencia 1 año-	\$14 000

Precio académico

MicroStripes, Licencia 1 año-	\$ 1 000
-------------------------------	----------

Información de apoyo al caso:

Del contacto que hemos tenido con el representante de Flometrics para esta región, hemos recibido tanto los precios de producto, como un documento en PDF que contiene una descripción más detallada de las características de MicroStripes. Dentro de esta presentación hemos encontrado una referencia específicamente a la capacidad de esta herramienta para simular antenas relacionadas con la tecnología RFID.

Evaluación del software:

Creemos que MicroStripes también podría ser una excelente opción para nuestro proyecto. Al igual que HFSS, éste también es un software altamente especializado y por lo tanto también está dirigido a un mercado empresarial con conocimientos técnicos desarrollados. Esto nos permite pensar que las capacidades del producto podrán satisfacer todas nuestras expectativas y podrá ser muy útil para la simulación de nuestra antena. Además también tenemos comprobado que este es un software que puede ser utilizado para el diseño de antenas RFID, que es el campo que nos interesa.

Sin embargo, al igual que con HFSS, también tenemos el problema del alto costo del producto y la preocupación que éste pueda ser una herramienta demasiado complicada como para que resulte útil en este proyecto. Si bien el precio por cada licencia de HFSS es menor al de MicroStripes, debido a que HFSS se distribuye en paquetes de 5, es posible que MicroStripes resulte más conveniente ya que lo más probable es que únicamente necesitemos una sola licencia y no las cinco que ofrece el competidor.

En comunicación con nuestro contacto en Flomerics se nos ha informado que podemos registrarnos para presenciar una demostración de la utilización del software en línea, además de poder hacer peticiones específicas sobre algún tipo de simulación con el software.

4 Computer Simulation Technology

Empresa: Computer Simulation Technology

Calif: 9.5

Página web: <http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Overview.aspx>

Contacto: Monika Balk <Monika.Balk@cst.com>

Nombre del software: CST MicroWave Studio v.2006

Descripción de fabricante:

CST MWS es una herramienta especializada para la simulación electromagnética en 3D rápida y precisa de problemas en alta frecuencia.

Sus aplicaciones incluyen las áreas de expansión como: comunicación móvil, diseño inalámbrico (bluetooth), integridad de señal y EMC. Excepcionalmente amigable al usuario, CST MWS rápidamente le permite a uno observar el comportamiento electromagnético en los diseños de alta frecuencia.

Esta herramienta posee un analizador en dominio del tiempo y uno en dominio de la frecuencia que permiten realizar una simulación en hexaedro y en tetraedro. CST MWS ofrece otro tipo de analizadores para aplicaciones específicas. Filtros para la importación de archivos CAD específicos y la extracción de parámetros SPICE mejoran las posibilidades de diseño y ahorran tiempo.

CST MicroWave Studio cada vez es visto por más Ingenieros como una herramienta estándar de desarrollo.

Ejemplos de la interfaz:

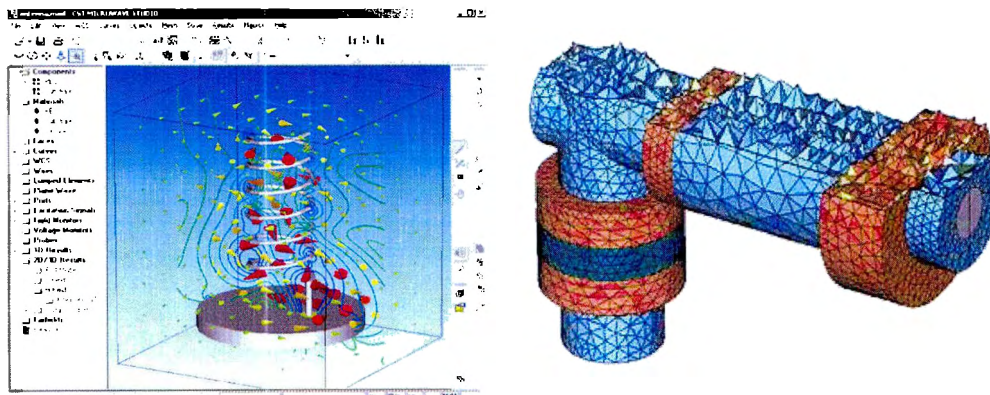


Figura 11. Interfaz del software Microwave Studio.

Información de precios (USD):

Precio comercial

CST MicroWave Studio .- **No disponibles**

Precio académico

CST MicroWave Studio .- **\$ 1 650**

Información de apoyo al caso:

Dentro de la página de esta compañía hemos encontrado en caso de aplicación del CST MWS en el diseño de una antena RFID de polarización circular para la banda de UHF. Esta sería la aplicación nosotros querríamos darle a esta herramienta por lo que nos resulta interesante y útil.

Evaluación del software:

Este software parece ser otra interesante opción de herramientas de simulación. Por la descripción del producto podemos ver que ofrece muchas de las características que nos han llamado la atención en programas como HFSS o MicroStripes.

Tiene la enorme ventaja de presentar como atributo su aplicación en el diseño de una antena RFID en la banda que nosotros deseamos diseñar. Además, hemos encontrado en su página web en documento de benchmark en la que se midieron éste y otros softwares de simulación al aplicarse al diseño de una “antena vivaldi”. En los resultados de este benchmark, CST asegura que CST MSW obtuvo mejores resultados en tiempo de simulación y manejo de memoria que el mismo HFSS de Ansoft.

La desventaja es la misma que la de las otras opciones, debido a la especialización necesitaremos mayor tiempo para conocer todas sus características.

Nuestro contacto en CST nos ha mencionado que para la aplicación que estamos buscando darle al software nos recomienda que adquiramos el paquete CST Studio Suite SEAT con Simulador Transitorio Resonante de Modo Propio en Dominio de Frecuencia.

5 FEKO

Empresa: FEKO

Calif: 7.0

Página web: <http://www.feko.info/index.html>

Nombre del software: CADFEKO

Descripción de fabricante:

FEKO es un código de computadora basado en método de momentos (MoM) para el análisis de problemas electromagnéticos como: EMC, recubrimientos, acoplamientos, diseño de antenas, posicionamiento de antenas, análisis, medios dieléctricos, análisis de dispersión, etc.

La implementación es comprensible y ha sido extendida para el análisis de hojas delgadas dieléctricas, cuerpos dieléctricos múltiples homogéneos y medios estratificados. Existen módulos disponibles para optimización paramétrica, análisis en dominio temporal y el análisis de estructuras de cable complejas en un ambiente 3D. FEKO incluye el Método Multipolo Rápido Multinivel (MLFMM) que es un eficiente método para resolver problemas largos usando la técnica certera de onda completa (MoM), pero que requiere mucho menos memoria que el convencional MoM.

Ejemplos de la interfaz:

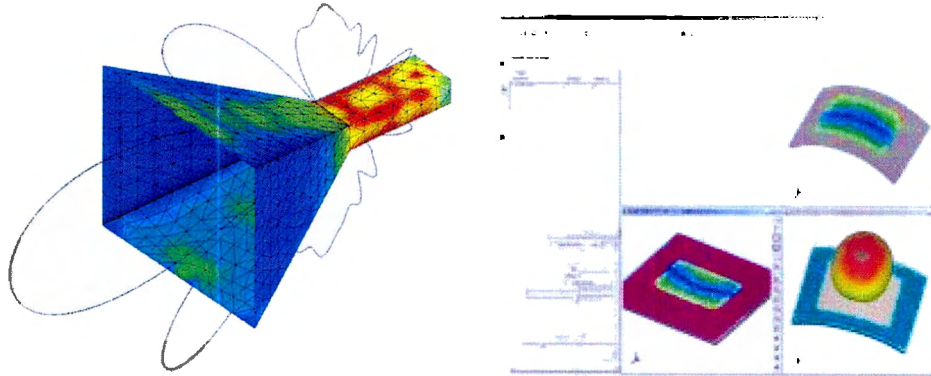


Figura 12. Interfaz del software CADFEKO

Información de precios (USD):

Precio académico
CADFEKO .-

No disponibles

Información de apoyo al caso:

Sobre este software no tenemos ninguna referencia directa de su utilización en el diseño de alguna antena RFID, como sabemos de sus competidores. Tampoco poseemos información aparte de la obtenida dentro de su misma página de Internet.

Evaluación del software:

Por la descripción de la página en Internet y las imágenes que ahí podemos observar, FEKO también parece ser un software bastante profesional. Las imágenes que hemos visto de la interfase gráfica y de las simulaciones muestran que es una herramienta poderosa y amigable para el usuario, aunque no tanto como HFSS, Microstripes o CST.

Sin embargo, éste producto fue el último que descubrimos y por tanto todavía no hemos intentado el contacto con algún representante de la empresa para recibir algún tipo de cotización.

La ventaja de esta opción es que hemos descargado de la página una versión de evaluación del software que tiene una vigencia de 45 días. Esto nos permitirá conocer mucho mejor la herramienta y decidir si tiene lo que necesitamos y si nos podría interesar adquirirlo.

ANEXO 2. EQUIPO MEDIDOR DE SWR

1 Agilent

1. Empresa: Agilent

Página Web: <http://www.agtel.com.mx/>

Producto: 8757D Scalar Network Analyzer

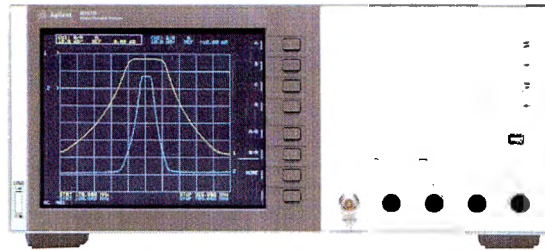


Figura 45. 8757D Scalar Network Analyzer

Precio: No disponible

Descripción:

El analizador escalar de red 8757D de Agilent permite medir pérdidas por inserción, ganancia, pérdidas de retorno, SWR y potencia de una manera rápida y precisa. Con detectores de alto desempeño y puentes direccionales, este analizador se convierte en la base de un sistema completo de mediciones.

Mediante su función de guardar/recordar se puede ahorrar mucho tiempo al momento de establecer configuraciones de la medición, y es posible mandar imprimir mientras se uno se prepara para la siguiente medición.

Posee un rango dinámico de hasta 83dB. Tiene salida para impresora o plotter. Display a color.

Contacto:

La forma de contactar Agilent en México es la siguiente:

Por teléfono:

Información General: +52 (55) 5575 6297 (MEX)

Por E-Mail:

Información General: ventas@agtel.com.mx

2. Diamond Antenna

2. Empresa: Diamond Antenna

Página Web: <http://www.dxzone.com/cgi-bin/dir/jump2.cgi?ID=3303>

Producto: SX1000 Medidor de Potencia y SWR



Figura 46. SX1000 Medidor de Potencia y SWR

Precio: No disponible

Descripción:

Rango de frecuencia de 1.8 hasta 1300MHz (S1: 1.8 – 160MHz y S2: 430 – 1300MHz). Posee rangos de potencia de 5W, 20W y 200W, con una precisión a escala completa de +/- 10%.

Requiere de un mínimo de potencia para realizar mediciones de SWR: 1W para S1, y 2W para S2. Su pérdida por inserción es menor a 0.2dB en S1 y menor a 0.15dB en S2. Es capaz de realizar mediciones de potencia incidente, potencia reflejada y de SWR. Tiene display de medidor iluminado que requiere de una alimentación externa de 13.8Vdc.

Sus dimensiones son: 155 x 63 x 103mm. Su peso: 890g. Posee dos sensores (S1 y S2) y una impedancia de 50 ohms.

Producto: SX600/SX600N Medidor de Potencia y SWR



Figura 47. SX600/SX600N Medidor de Potencia y SWR

Precio: No disponible

Descripción:

Rango de frecuencia de 1.8 hasta 525MHz (S1: 1.8 – 160MHz y S2: 140 – 525MHz). Posee rangos de potencia de 5W, 20W y 200W, con una precisión a escala completa de +/- 10%.

Requiere de un mínimo de potencia para realizar mediciones de SWR: 1W para S1, y 4W para S2. Su pérdida por inserción es menor a 0.2dB en S1 y menor a 0.3dB en S2. Es capaz de realizar mediciones de potencia incidente, potencia reflejada y de SWR. Tiene display de medidor iluminado que requiere de una alimentación externa de 13.8Vdc.

Sus dimensiones son: 155 x 63 x 103mm. Su peso: 630g. Posee dos sensores (S1 y S2) y una impedancia de 50 ohms.

Producto: SX400/SX400N Medidor de Potencia y SWR



Figura 48. SX400/SX400N Medidor de Potencia y SWR

Precio: No disponible

Descripción:

Rango de frecuencia de 140 hasta 525MHz.

Posee rangos de potencia de 5W, 20W y 200W. Precisión a escala completa: 5W Rango +/-10%, 20W Rango +/-5%, 200W Rango +/-5% (Añadir -10% a escala completa entre 220 y 420 MHz, añadir +10% a escala completa entre 450 y 525MHz).

Requiere de un mínimo de potencia para realizar mediciones de SWR: 4W.

Su pérdida por inserción es menor a 0.1dB entre 140 y 250MHz, menor a 0.2dB entre 400 y 470MHz y menor a 0.3dB en 525MHz.

Es capaz de realizar mediciones de potencia incidente, potencia reflejada y de SWR. Tiene display de medidor iluminado que requiere de una alimentación externa de 13.8Vdc.

Sus dimensiones son: 155 x 63 x 103mm. Su peso: 630g. Su impedancia es de 50 ohms.

Contacto:

La forma de contactar Diamond Antenna es la siguiente:

Por teléfono:

Información General: 03-3947-1411 (JAP)

Por E-Mail:

Información General: overseas@diamond-ant.co.jp

3 Array Solutions

3. Empresa: Array Solutions

Página Web: <http://www.dxzone.com/cgi-bin/dir/jump2.cgi?ID=1856>

Producto: PowerMaster Medidor de Potencia y VSWR



Figura 49. PowerMaster Medidor de Potencia y VSWR

Precio:

PowerMaster - 3kW Display sin acoplador, \$235.00 US
PowerMaster - 10kW Display sin acoplador \$235.00 US
PowerMaster - Con acoplador HF-3K y conector SO239 \$430.00 US
PowerMaster - Con acoplador HF-10K y conector SO239 \$535.00 US

Descripción:

Precisión típica de +/-3% sobre frecuencias en las bandas de VHF, UHF y microondas.
Modo de picos programable para CW rápido, medio y lento, SSB, datos, FM o cualquier otra señal que se le envíe.

Dos modelos disponibles: 1-3kW y 1-10kW

La caja de display y la del sensor se encuentran separadas para evitar radiaciones parásitas provenientes de los cables.

Posee alarmas de VSWR y de Potencia para protección.

Tiene una barra graficadora que puede operar en dos modos, de autoajuste o con rangos seleccionados por el usuario.

Display con intensa iluminación fluorescente.

Carcaza de metal. Dimensiones: 210 x 85 x 106mm

Contacto:

La forma de contactar Arrey Solutions es la siguiente:

Por teléfono:

Información General: 972-203-2008 (EUA)

Por E-Mail:

Información General: wx0b@arraysolutions.com

Información de Ventas: jayt@arraysolutions.com

Soporte a clientes: wx0b@arraysolutions.com

4 PROCOM Antenas

4. Empresa: PROCOM Antennas

Página Web: <http://www.dxzone.com/cgi-bin/dir/jump2.cgi?ID=9083>

Producto: SWR 3000 Medidor de SWR



Figura 50. SWR 3000 Medidor de SWR

Precio: No disponible

Descripción:

Realiza un examen completo del curso del SWR. Posee un display de gráficas claro. Fácil manejo de los parámetros de la medición. Incluye cargador de baterías, paquete de baterías recargables NiMh y adaptador para corriente alterna (europea).

Es un analizador y medidor completo de SWR, controlado por microprocesador.

Posee un rango de frecuencias que va desde los 30 hasta 2700MHz. Ofrece la posibilidad de ajustar la frecuencia central y el span. El rango de medición de SWR es desde 1:1 hasta 5:1. Basta con introducir los parámetros de frecuencia, presionar un botón y la curva de SWR es mostrada en el display. Los parámetros de la frecuencia pueden ser fácilmente cambiados durante las mediciones. Posee botones para guardar posiciones dentro de la mediciones y de esta forma facilitar el análisis.

Hace posible un control simple y sencillo de instalaciones con antenas. Se opera desde un menú lógico.

Contacto:

La forma de contactar PROCOM Antennas es la siguiente:

Por teléfono:

Información General: +45 48 27 84 84 (DEN)

Por E-Mail:

Información General: www.procom-dk.com

Información General: www.procom-danmark.dk

5 Ameritron

5. Empresa: Ameritron

Página Web: <http://www.dxzone.com/cgi-bin/dir/jump2.cgi?ID=1236>

Producto: AWM-30 Wattmetro y SWR de precisión con rangos de 3000/300 Watts



Figura 51. AWM-30 Wattmetro

Precio: \$149.95 US

Descripción:

Ameritron diseñó el AWM-30 para realizar mediciones certeras y precisas de potencia. Esta precisión es el resultado de un acoplador direccional, un circuito activo lector de picos y un circuito medidor de movimiento d'Arsonval.

El AWM de Ameritron mide potencia promedio y picos de potencia sobre una pantalla iluminada de aguja cruzada. Posee rangos de 3000/300 Watts. Mide potencia incidente y reflejada y el SWR en solo movimiento. Posee un ahorrador de batería que permite

apagar el equipo cuando no hay presencia de RF. Utiliza 12 Vdc o pilas de 9 V. Cobertura de 1 año por la garantía de Ameritron.

Producto: Wattmetro y medidor de SWR plano portátil



Figura 52. Wattmetro y medidor de SWR plano portátil

Precio: \$159.95 US

Descripción:

El Wattmetro y medidor de SWR plano de Ameritron tiene sólo 1 5/8 pulgadas de grosor, por lo que puede ser fácilmente montado. Posee un sensor remoto que gracias a su cable delgado de 25 pies, puede ser colocado en una posición cómoda. Este medidor maneja 1500 Watts, desde 1.8 hasta 30 MHz. Posee pantalla iluminada de aguja cruzada. Dispositivos electrónicos activos permiten medir potencia promedio y picos de potencia en rangos de 3000/300 Watts. LED de "SWR alto" Utiliza 12 Vdc o batería de 9 V.

Contacto:

La forma de contactar Ameritron es la siguiente:

Por teléfono:

Información General:	(662) 323-8211 (EUA)
Soporte Técnico:	(662) 323-8211 (EUA)
Número de Fax:	(662) 323-6551 (EUA)

Por E-Mail:

Preguntas del Website:	website@ameritron.com
Solicitud de Manuales:	manuals@ameritron.com
Solicitud de catálogos:	catalogs@ameritron.com
Servicios al cliente:	ameritron@ameritron.com