

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

ANTENAS PLANARES PARA BEAMFORMING UTILIZANDO ELEMENTOS QUASI YAGIS

Tesis para optar el Título de Ingeniero de las Telecomunicaciones, que presenta el
bachiller:

KATHERIN GRIFFI SANTOS ESTRADA

ASESOR: Dr. Manuel Augusto Yarlequé Medina

Lima, mayo de 2013

Resumen

El presente proyecto de tesis consiste en investigar, diseñar y desarrollar arreglos de antenas planares utilizando elementos quasi Yagis que permita incrementar el ancho de banda y ganancia de las mismas, sintonizados a la frecuencia de 2.4 GHz. Esto con la finalidad de que puedan ser aplicadas a la tecnología *beamforming*.

En el primer capítulo, muestra el estado del arte, en el cual se describe el *guidline* para poder desenvolver un proyecto de antenas. También se desarrolla el concepto de antenas microcinta, con sus diversas técnicas de alimentación. Asimismo, el tipo sustrato que se utilizan en este tipo de antenas planares.

En el segundo capítulo, se revisa la teoría de antenas para banda ancha, específicamente la antena Yagi Uda en su configuración no plana y plana, llamada quasi Yagi. Además, se define el diagrama de flujo para poder dimensionar el proyecto de la antena quasi Yagi.

El tercer capítulo, está relacionado con el estudio de arreglos de antenas conformados por elementos quasi Yagis. Del mismo modo, se revisa conceptos teóricos de antenas inteligentes y de la tecnología *beamforming*.

En el cuarto y último capítulo se realiza la medición del sustrato a utilizarse. Asimismo, se presenta el estudio de la variación geométrica del driver, directores en configuraciones distintas y arreglos. Finalmente se realiza las simulaciones, mediciones e implementaciones de los prototipos desarrollados en la presente tesis.

Por último, se presentan las conclusiones a las que se llegaron después de culminar el presente trabajo.

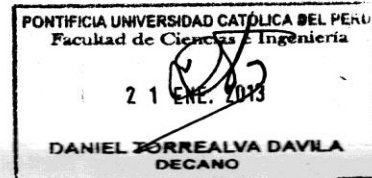
FACULTAD DE
CIENCIAS E
INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO DE LAS
TELECOMUNICACIONES**

Título : ANTENAS PLANARES PARA BEAMFORMING UTILIZANDO
ELEMENTOS QUASI YAGIS
Área : Radiocomunicaciones # 206
Asesor : Dr. Manuel Yarlequé Medina
Alumno : Katherin Griffi Santos Estrada
Código : 20057154
Fecha : 29/30/2012



Descripción y Objetivos

Las comunicaciones inalámbricas nos permiten vivir y trabajar de un modo bastante diferente del convencional representando una mudanza en los ambientes del trabajo como también en nuestros hogares, estas nos ofrecen flexibilidad y movilidad. Las comunicaciones inalámbricas actuales comprende ahora una amplia gama de tecnologías, incluyendo: Sistema móvil celular, servicio móvil personal, satélite, radios móviles especializados, etc.

Las redes inalámbricas convencionales utilizan diseños no muy eficientes de antenas sectorizadas hacia un punto fijo y omnidireccional. La tecnología Beamforming aumenta la eficiencia del uso del espectro y el uso de energía en comparación con los sistemas tradicionales, esta tecnología utiliza arreglos de antenas adaptativas que permiten direccionar el haz principal, configurar múltiples haces y/o generar valores nulos sobre las señales de interferencia, mejorando así la recepción de la señal y la capacidad para la reutilización de frecuencias.

El objetivo de este trabajo es investigar, proyectar y desenvolver una modalidad de antena planar utilizando elementos quasi Yagis que pueda incrementar su ancho de banda sin la degradación de otras cualidades para aplicaciones de Beamforming.

En este trabajo las propuestas que se desarrollará estará basada en la optimización de la antena quasi Yagi, el estudio de los diversos drivers, variación en el número y configuración de sus directores, innovación de su estructura y finalmente en el diseño de arreglos.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Especialidad de Ingeniería de las Telecomunicaciones


Ing. LUIS ANGELO VELARDE CRIADO
Coordinador

FACULTAD DE
CIENCIAS E
INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO DE LAS
TELECOMUNICACIONES

Título : ANTENAS PLANARES PARA BEAMFORMING UTILIZANDO
ELEMENTOS QUASI YAGIS

Índice

Introducción

1. Estado del Arte.
2. Desarrollo de antenas para Banda Ancha.
3. Arreglos de antenas para Beamforming.
4. Simulación, implementación y mediciones.

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos

Máximo: 100 páginas

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Especialidad de Ingeniería de las Telecomunicaciones



Ing. LUIS ANGELO VELARDE CRIADO
Coordinador



Dedicatoria

A mis padres, porque creyeron en mí y porque me sacaron adelante, dándome ejemplos dignos de superación y entrega.

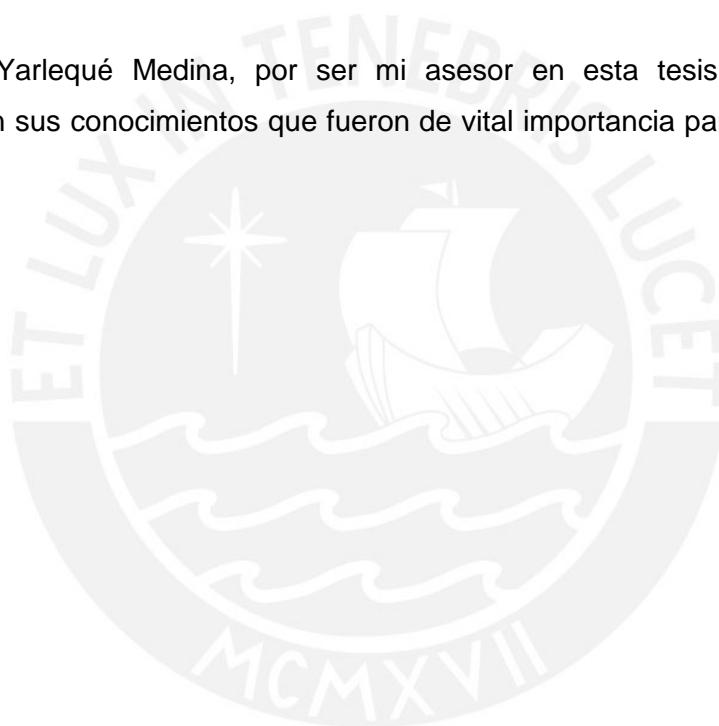


Agradecimientos

A mis padres, que me permitieron culminar mis estudios en esta carrera, asimismo me ayudaron, apoyaron y orientaron en cada momento de mi vida. Ambos son las personas más importantes en mi vida, y son la fuente de inspiración para mi trabajo, siempre estaré agradecido con ellos.

A mi hermano, tíos, abuelos y amigos. Gracias por haber fomentado en mí el deseo de superación y anhelo en la vida.

Al Dr. Manuel Yarlequé Medina, por ser mi asesor en esta tesis, orientándome y ayudándome con sus conocimientos que fueron de vital importancia para el desarrollo de la presente tesis.



Índice

Resumen	II
Índice	VII
Lista de figuras	X
Introducción	12
Capítulo 1 Estado del Arte	14
1.1 Desarrollamiento de la comunicación	14
1.2 Dimensionamiento de Antenas	16
1.3 Antenas planares de microcinta	18
1.3.1 Técnicas de alimentación de antenas patch	21
1.3.1.1 Alimentación por conector coaxial	21
1.3.1.2 Alimentación por línea de microcinta	22
1.3.1.3 Alimentación por acoplamiento electromagnético por línea de microcinta	24
1.4 Substrato para antenas de microcinta	25
Capítulo 2 Desarrollo de Antenas para Banda Ancha	26
2.1 Introducción	26
2.2 Antenas tipo Yagi	27
2.2.1 Antenas Yagi Uda	27
2.2.2 Antenas quasi Yagi	29
2.3 Diagrama de flujo del proyecto de la antena quasi Yagi	31

Capítulo 3 Arreglos de Antenas para Beamforming.....	34
3.1 Arreglo de antenas	34
3.1.1 Elementos de un arreglo	35
3.1.2 Factor de arreglo.....	36
3.1.3 Tipos de alimentación de un arreglo.....	38
3.2 Arreglo de antenas quasi Yagis	39
3.3 Antenas inteligentes	41
3.3.1 Utilidad.....	42
3.3.2 Ventajas y desventajas	42
3.4 Tecnología Beamforming.....	43
3.4.1 Formación del haz digitalmente.....	44
Capítulo 4 Simulación, Implementación y Mediciones	46
4.1 Ambiente computacional	46
4.1.1 EMPro	46
4.1.2 ADS	47
4.2 Medición del sustrato a utilizarse	47
4.3 Análisis de la antena quasi Yagi	49
4.3.1 Característica de la antena quasi Yagi	52
4.3.2 Análisis del patrón de radiación de la antena quasi Yagi	56
4.4 Estudio de la influencia geométrica del driver y del director.....	58
4.4.1 Driver en formato de patches	58
4.4.2 Directores en la configuración log-periódica.....	61
4.4.3 Directores en configuración múltiple.....	65
4.4.4 Comparación de resultados de los prototipos presentados	68

4.5 Arreglo lineal de elementos quasi Yagi.....	69
4.6 Arreglo de elementos quasi Yagis para Beamforming	72
4.6.1 Formacion del haz de radiacion para aplicaciones beamforming.....	75
Conclusiones y Recomendaciones.....	78
• Conclusiones.....	78
• Recomendaciones.....	79
Bibliografía.....	81
ANEXOS	84



Lista de Figuras

FIGURA1-1: REPRESENTACIÓN SIMPLIFICADA DE UNA ANTENA, DEFINIDA COMO UN ELEMENTO DE TRANSICIÓN ENTRE UNA ONDA GUIADA Y UNA EN EL ESPACIO LIBRE.	15
FIGURA1-2: DIMENSIONAMIENTO DE UNA ANTENA.	17
FIGURA1-3: CONFIGURACIÓN DE UNA ANTENA MICROCINTA CON ELEMENTO RADIADOR RECTANGULAR	19
FIGURA1-4: FORMATOS MÁS COMUNES ADOPTADOS PARA EL ELEMENTO RADIADOR.....	19
FIGURA1-5: ANTENA DE MICROCINTA CON FORMATO RECTANGULAR ALIMENTADO POR CONECTOR COAXIAL.....	21
FIGURA1-6: ANTENA DE MICROCINTA RECTANGULAR ALIMENTADA POR UNA LÍNEA DE MICROCINTA.	22
FIGURA1-7: LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO EN LA ANTENA PATCH.	23
FIGURA1-8: ANTENA MICROCINTA CON FORMATO RECTANGULAR ALIMENTADA A TRAVÉS DE ACOPLAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO.....	24
FIGURA 2-1: ESQUEMA DE UNA ANTENA YAGI UDA CON UN ELEMENTO REFLECTOR, UN ALIMENTADOR Y DIRECTORES.....	28
FIGURA 2-2: ANTENA QUASI YAGI.....	31
FIGURA 2-3: DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL PROYECTO DE ANTENA QUASI YAGI. 32	
FIGURA 3-1: CONFIGURACIÓN EQUIVALENTE PARA DETERMINAR EL FACTOR DE ARREGLO	37
FIGURA 3-2: ARREGLO DE DOS ELEMENTOS	38
FIGURA 3-3: (a) ALIMENTACIÓN PARALELA (b) ALIMENTACIÓN EN SERIE (c) ALIMENTACIÓN EN EL ESPACIO	39
FIGURA 4-1: MEDICIÓN DEL SUBSTRATO EN EL ANALIZADOR DE REDES VNA.....	47
FIGURA 4-2: PÉRDIDA DE RETORNO PARA LA MEDICIÓN DEL SUBSTRATO.....	48
FIGURA 4-3: TRANSFORMADOR DE ADAPTACIÓN DE $\lambda_g/4$ ENTRE LA LÍNEA MICROSTRIP Y LA JUNTURA T.....	50
FIGURA 4-4:PROTOTIPO DE LA ANTENA QUASI YAGI	52
FIGURA 4-5: ANTENA QUASI YAGI CONSTRUIDA.....	54

FIGURA 4-6: PÉRDIDA DE RETORNO SIMULADA Y MEDIDA PARA LA ANTENA QUASI YAGI.....	55
FIGURA 4-7: (a) IMPEDANCIA DE ENTRADA DE LA ANTENA QUASI YAGI (b) VSWR DE LA ANTENA QUASI YAGI.....	56
FIGURA 4-8: (a) GANANCIA Y (b) DIRECTIVIDAD DE LA ANTENA QUASI YAGI.....	57
FIGURA 4-9: DIAGRAMA DEL PATRÓN DE RADIACIÓN DE LA ANTENA QUASI YAGI	57
FIGURA 4-10: DISTRIBUCIÓN DE CAMPO EN LA ANTENA QUASI YAGI.....	58
FIGURA 4-11: (a) MEDIDAS DEL <i>DRIVER</i> EN FORMA DE PATCH Y (b) SU RESPECTIVO PROTOTIPO	59
FIGURA 4-12: PÉRDIDA DE RETORNO SIMULADAS Y MEDIDA PARA LA ANTENA QUASI YAGI EN FORMATO PATCH.....	60
FIGURA 4-13: IMPEDANCIA DE ENTRADA DE LA ANTENA QUASI YAGI EN FORMATO PATCH	60
FIGURA 4-14: (a) GANANCIA Y (b) DIRECTIVIDAD DE ANTENA QUASI YAGI EN FORMATO PATCH.....	61
FIGURA 4-15: DIAGRAMA DEL PATRÓN DE RADIACIÓN DE LA ANTENA QUASI YAGI EN FORMATO PATCH	61
FIGURA 4-16: (a) MEDIDAS DE LA ANTENA QUASI YAGI EN CONFIGURACIÓN LOG-PERIÓDICA Y (b) SU RESPECTIVO PROTOTIPO.....	62
FIGURA 4-17: PÉRDIDA DE RETORNO SIMULADAS Y MEDIDA PARA LA ANTENA QUASI YAGI EN CONFIGURACIÓN LOG-PERIÓDICA.....	64
FIGURA 4-18: (a) GANANCIA Y (b) DIRECTIVIDAD DE LA ANTENA QUASI YAGI EN CONFIGURACIÓN LOG-PERIÓDICA	65
FIGURA 4-19: PATRÓN DE RADIACIÓN DE LA ANTENA QUASI YAGI EN CONFIGURACIÓN LOG-PERIÓDICA	65
FIGURA 4-20: (a) MEDIDAS DE LA ANTENA QUASI YAGI CON MÚLTIPLOS DIRECTORES Y (b) SU RESPECTIVO PROTOTIPO	66
FIGURA 4- 21: PÉRDIDA DE RETORNO SIMULADA Y MEDIDA PARA LA ANTENA QUASI YAGI EN CONFIGURACIÓN MÚLTIPLE.....	67
FIGURA 4-22: (a) MUESTRA LA GANANCIA Y (b) MUESTRA LA DIRECTIVIDAD DE LA ANTENA QUASI YAGI.....	67
FIGURA 4-23: PATRÓN DE RADIACIÓN DE LA ANTENA QUASI YAGI EN CONFIGURACIÓN MÚLTIPLE	68

FIGURA 4-24: (a) PROTOTIPO DEL ARREGLO LINEAL DE CUATRO ELEMENTOS E (b) IMPLEMENTACIÓN DEL ARREGLO LINEAL DE CUATRO ELEMENTOS	70
FIGURA 4-25: PÉRDIDA DE RETORNO SIMULADA Y MEDIDA PARA UN ARREGLO DE CUATRO ELEMENTOS QUASI YAGIS	70
FIGURA 4-26:(a) GANANCIA Y (b) DIRECTIVIDAD DEL ARREGLO DE ELEMENTOS QUASI YAGIS.....	71
FIGURA 4-27: PATRÓN DE RADIACIÓN DE UN ARREGLO LINEAL DE CUATRO ELEMENTOS QUASI YAGIS	72
FIGURA 4-28: ARREGLO DE ELEMENTOS QUASI YAGIS PARA APLICACIONES DE BEAMFORMING.....	73
FIGURA 4-29: PÉRDIDA DE RETORNO DEL ARREGLO DE CUATRO ELEMENTOS QUASI YAGIS PARA APLICACIONES BEAMFORMING	73
FIGURA 4-30: (a) GANANCIA EN EL PLANO DE ELEVACIÓN, (b) DIRECTIVIDAD EN EL PLANO DE ELEVACIÓN, (c) GANANCIA EN EL PLANO AZIMUT Y (d) DIRECTIVIDAD EN EL PLANO AZIMUT DEL ARREGLO DE CUATRO ELEMENTOS QUASI YAGIS PARA APLICACIONES DE BEAMFORMING.	74
FIGURA 4-31: PATRÓN DE RADIACIÓN DE UN ARREGLO DE ELEMENTOS QUASI YAGI PARA APLICACIONES BEAMFORMING	75
FIGURA 4-32: PROTOTIPOS DEL ARREGLO LINEAL CON DESFASES EN LA ALIMENTACIÓN CON LA MEDICIÓN DE SU PATRÓN DE RADIACIÓN PARA CADA PROTOTIPO	77

Introducción

Las comunicaciones inalámbricas nos permiten vivir y trabajar de un modo bastante diferente del convencional representando un cambio en los ambientes del trabajo como también en nuestros hogares, estas nos ofrecen flexibilidad y movilidad. Las comunicaciones inalámbricas actuales comprende ahora una amplia gama de tecnologías, incluyendo: sistema móvil celular, servicio móvil personal, satélite, radios móviles especializados y también WLANs (*Wireless Local Area Network*) o redes locales inalámbricas.

El rápido desenvolvimiento de las tecnologías 3G y 4G (sistemas *wireless* de tercera y cuarta generación) y el creciente mercado para sus equipamientos, ha motivado la búsqueda de antenas con mejores prestaciones, es decir que cumplan con los requerimientos más estrictos de estas tecnologías, tales como el patrón de radiación, acoplamiento, y ganancia. Las antenas juegan un papel fundamental en el desempeño de las comunicaciones inalámbricas de última generación, fortaleciendo así su área de investigación, pues hasta 2G (sistema *wireless* de segunda generación) la atención estaba centrada más en el desarrollo de protocolos y de técnicas de modulación más eficientes.

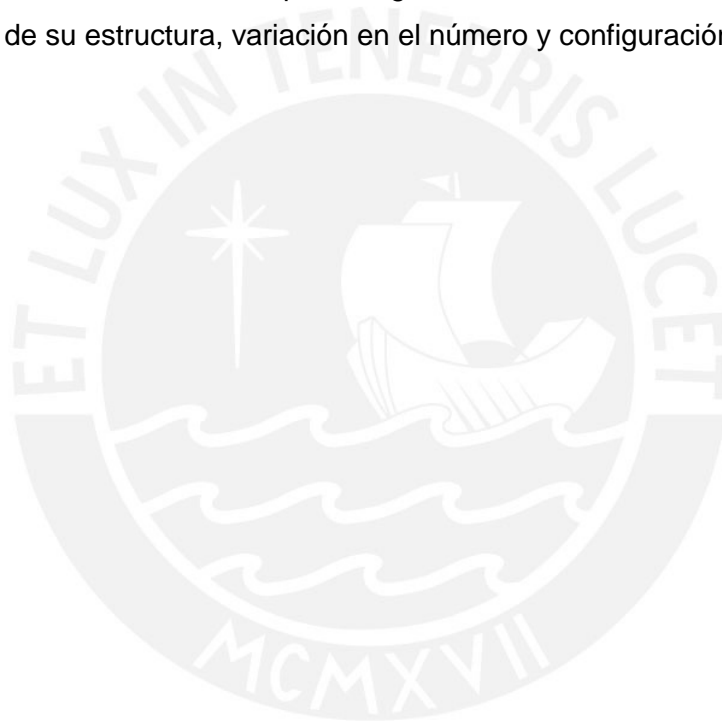
Las antenas planares presentan un bajo peso, volumen liviano, facilidad de montaje y bajo costo tornándose atractivas para aplicaciones inalámbricas. Además de sus ventajas físicas y económicas, las antenas planares también son convenientes por que consiguen incrementar la relación *front to back* tanto en la estación receptora y en la transmisora.

Las redes inalámbricas convencionales utilizan diseños no muy eficientes de antenas sectorizadas, con patrón de radiación direccionado hacia un área específica u omnidireccional. La tecnología *beamforming* aumenta la eficacia del uso del espectro en comparación con los sistemas tradicionales, por cuanto utiliza arreglos de antenas adaptativas que permiten direccionar el haz principal, y/o configurar múltiples haces. Así mismo, permite generar nulos en el diagrama de radiación en determinadas direcciones que se consideran interferentes. Como resultado, se mejora la recepción

de la señal, se minimizan las interferencias y se aumenta la capacidad de reutilización de frecuencias.

El objetivo de este trabajo es investigar, diseñar y desarrollar arreglos de antena planares utilizando elementos quasi Yagis que permita incrementar el ancho de banda y ganancia de las mismas, sin la degradación de otras características. Esto con la finalidad de que puedan ser aplicadas a la tecnología *beamforming*.

En este trabajo, las propuestas que se desarrollará estarán basadas en la optimización de los elementos de la antena quasi Yagi; esto es, el estudio de los diversos drivers, innovación de su estructura, variación en el número y configuración de sus directores.



Capítulo 1

Estado del Arte

1.1 Desarrollo de la comunicación

La comunicación es el principal medio para la transmisión y desarrollo del conocimiento, y es imprescindible para la evolución de una sociedad.

Para que la comunicación exista, o sea, para que alguna información sea enviada de algún punto a otro, es necesario que existan algunos componentes como: emisor, receptor, mensaje, medio de propagación, juntamente con algún tipo de protocolo para que la información enviada pueda ser comprendida de forma satisfactoria. Antiguamente, la comunicación podía ser alcanzada utilizando dispositivos como tambores, cornetas y otros elementos sonoros que surgieron. Asimismo, para distancias mayores, los métodos visuales comenzaron a ser utilizados, como señales de humo y fuegos artificiales [STU1998].

Con el pasar del tiempo y la necesidad de comunicación a largas distancias, otros medios de comunicación fueron surgiendo, las señales de humo y los diferentes dispositivos sonoros fueron sustituidos por el teléfono, radio, televisión, cine y

recientemente por el internet. Así, se tornó necesario la creación de nuevos canales de comunicación y de un conjunto de instrumentos tecnológicos que abordaran grandes distancias, surgiendo así una nueva área de estudios: las telecomunicaciones.

Telecomunicaciones (*tele*, en griego significa distancia) es la transmisión, emisión o recepción por cable, radio, medios ópticos o cualquier otro proceso electromagnético de símbolos, caracteres, señales, imágenes, sonidos o informaciones de cualquier naturaleza. En este tipo de comunicación, el emisor y el receptor poseen un elemento común, por donde es realizada la transmisión y que es impredecible para el establecimiento de la comunicación, llamado antena.

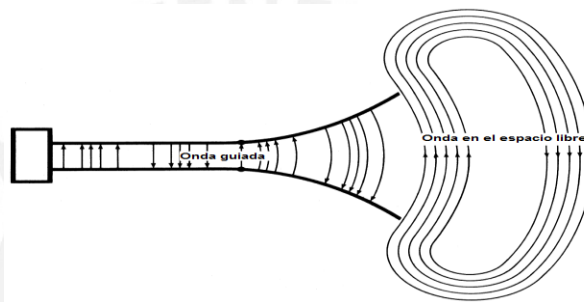


FIGURA1- 1: REPRESENTACIÓN SIMPLIFICADA DE UNA ANTENA, DEFINIDA COMO UN ELEMENTO DE TRANSICIÓN ENTRE UNA ONDA GUIADA Y UNA EN EL ESPACIO LIBRE.

Fuente: "Transición entre una onda guiada y una en el espacio libre" [BAL1997]

La antena es definida como "una estructura asociada con la región de transición entre una onda guiada y una onda en el espacio libre, o viceversa", como es ilustrado en la figura 1-1. En otras palabras, es una estructura de transición entre el espacio libre y un dispositivo guía, que puede ser un cable coaxial o una guía de onda, que es utilizado para transportar energía electromagnética de una fuente transmisora hacia una antena (transmisión) o de una antena hacia una fuente receptora (recepción) [BAL1997].

La definición oficial utilizada por IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) para una antena es simple: "La parte de un sistema de transmisión o recepción que es proyectada para radiar o recibir ondas electromagnéticas" [IEE1993].

La fundamentación teórica de antenas está enraizada en los primeros trabajos con electricidad, comenzando con la observación de cargas eléctricas por los griegos. En

1820, Hans Chrisitan Oersted descubrió que una corriente eléctrica producía una fuerza magnética. En 1831, Michael Faraday concibió el principio de campo magnético y su representación por líneas de fuerza. En 1873, James Lerk Maxwell publicó *Eletricity and Magnetism*, donde completaba la teoría de campo y proporcionaba las ecuaciones que describían el campo electromagnético.

Construidas y empleadas por Heinrich Hertz entre 1885 y 1887, con la finalidad de auxiliar en el estudio y desenvolvimiento de las teorías electromagnéticas previamente descritas por Maxwell, las antenas se tornaron uno de los principales instrumentos en telecomunicaciones y en la transmisión de datos inalámbricos.

Las antenas son utilizadas principalmente en circunstancias en las cuales la utilización de cables y guías de onda son imposibles, impracticables o económicamente inviables, como en [GIR2003]:

- Comunicación entre aeronaves, naves espaciales y navíos.
- Transmisión de tipo *broadcast*, en la cual la antena envía energía en varias direcciones.
- Transmisión en altas frecuencias para largas distancias.

Una antena ideal, es en la mayoría de las aplicaciones, es aquella que radia toda la energía que llega por un transmisor (generalmente una línea de transmisión) en una dirección o varias direcciones deseadas con una determinada polarización.

1.2 Dimensionamiento de Antenas

Un proyecto de antenas es un tema de grande importancia en electromagnetismo y envuelve una clasificación de varios parámetros físicos para alcanzar valores óptimos de ganancia, ancho de banda, VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*), entre otros.

Con la disponibilidad de métodos numéricos y programas sofisticados de computador, como métodos de los momentos (MoM), método de los elementos finitos (FEM) y método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD), se puede proyectar antenas y arreglos con geometrías más complicadas y con diferentes tipos de alimentación.

La figura 1-2 muestra el diagrama de flujo del dimensionamiento de antenas y está dividido en dos fases: la síntesis y análisis de la estructura.

El análisis se encarga básicamente de determinar el patrón de radiación, impedancia, ganancia, directividad y eficiencia de una determinada estructura. La síntesis es la determinación de los parámetros físicos, como longitud de onda, anchura y ángulos para que una antena pueda alcanzar un objetivo específico, como producir un patrón de radiación deseado o un coeficiente de reflexión bajo de un determinado límite dentro de un rango de frecuencias.

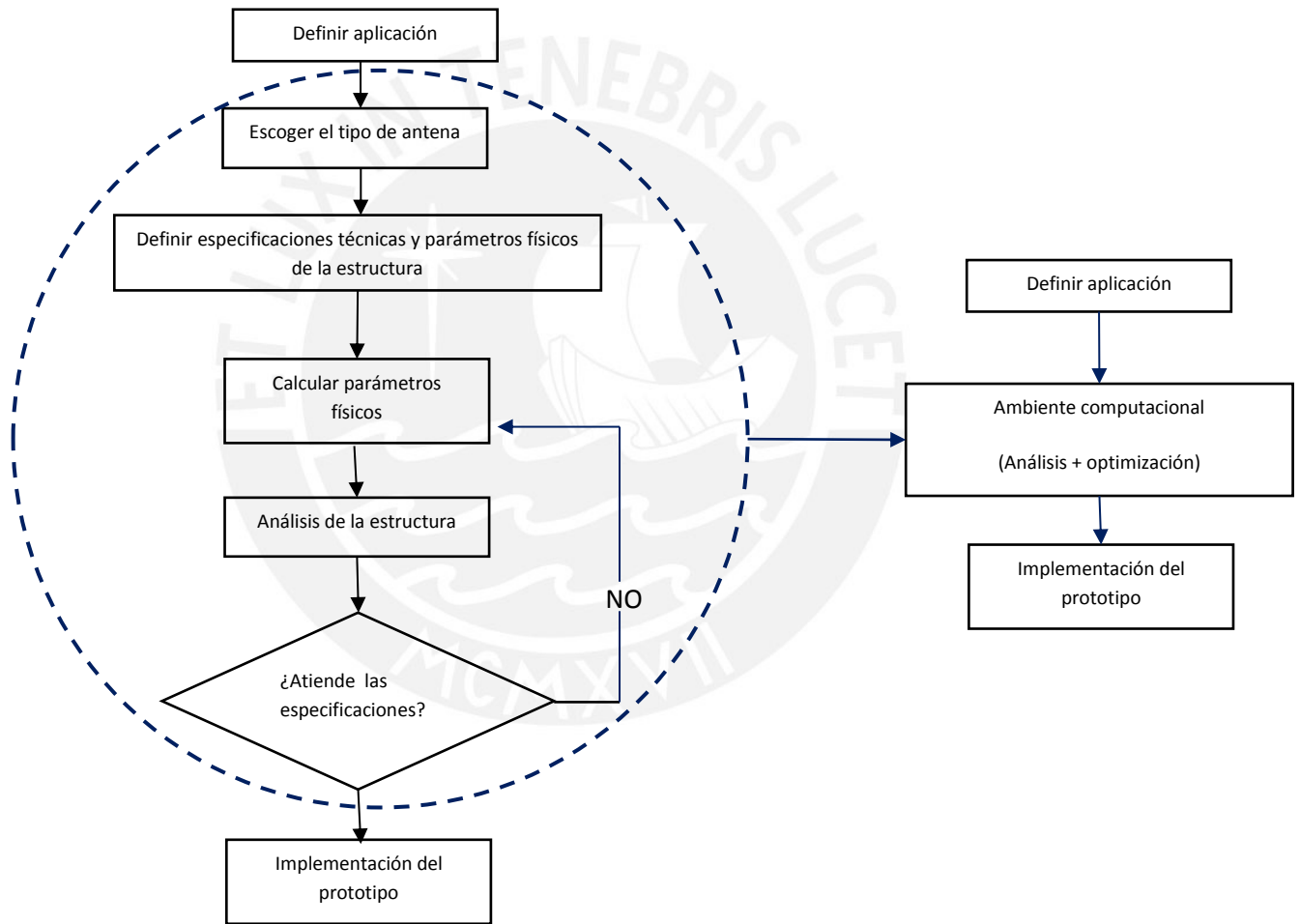


FIGURA1-2: DIMENSIONAMIENTO DE UNA ANTENA

Fuente: “Ambiente evolutivo para el dimensionamiento de una antena” [BAR2007]

Observando la figura 1-2, después de definida la aplicación, el tipo de antena es escogido, sus especificaciones técnicas son determinadas y sus parámetros físicos son calculados. Una vez obtenida la estructura completa de la antena, se da la fase del

análisis de la misma. En caso que la antena cumpla las especificaciones técnicas deseadas, como polarización lineal o ganancia por encima de un valor determinado, el prototipo es implementado. Caso contrario, los parámetros físicos necesitan ser recalculados y la antena sometida a un nuevo análisis. Ese ciclo continúa hasta que las especificaciones técnicas sean atendidas. Cabe distinguir que este ciclo es realizado por el proyectista y guiado por su experiencia e intuición.

Optimización es el acto de minimizar el esfuerzo requerido o maximizar el beneficio deseado. En los últimos años, los métodos de optimización comenzaron a ser aplicados en electromagnetismo. Varios tipos de antenas han sido proyectados y optimizados como dipolos, hélices, cornetas, lentes y antenas de microcinta. Los métodos de optimización no solo son capaces de refinar y rehacer formatos ya existentes de forma automática, ya que también se puede llegar a nuevos formatos nunca antes concebidos y a soluciones no intuitivas.

1.3 Antenas planares de microcinta

La configuración como es conocido en los días actuales para antenas de microcinta fue propuesta por [HOW1972] y [MUN1972]. Sin embargo, el primer trabajo fue propuesto por Deschamps [DES1953]. También conocidas como antenas impresas su configuración más simple, consiste en un elemento radiador (*patch*) con espesura t , sobre uno de los lados del substrato eléctrico con altura h y en el otro un plano a tierra como es mostrado en la figura 1-3.

El material conductor normalmente es cobre y en algunas aplicaciones de ondas milimétricas el oro, debido a su mayor conductividad, puede asumir virtualmente cualquier formato, los más frecuentes son formatos convencionales, tales como rectángulos, círculos y cuadrados para simplificar el análisis matemático y su predicción del desempeño. Los diferentes tipos de antenas impresas son distinguibles principalmente por la geometría del elemento conductor. Algunos de estos formatos pueden ser observados en la figura 1-4.

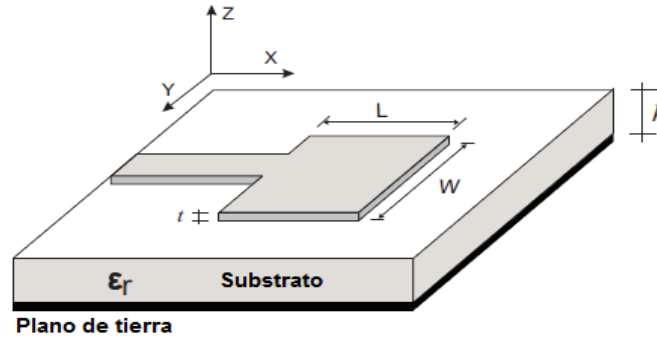


FIGURA1-3: CONFIGURACIÓN DE UNA ANTENA MICROCINTA CON ELEMENTO RADIADOR RECTANGULAR

Fuente: “Antena microcinta rectangular” [BAR2007]



FIGURA1-4: FORMATOS COMUNES ADOPTADOS PARA EL ELEMENTO RADIADOR

Fuente: Elaboración propia

Después de la década del 70, las antenas de microcinta fueron más exploradas debido al surgimiento de substratos con bajas pérdidas y buenas características térmicas y mecánicas. El aumento de aplicaciones inalámbricas como GSM (*Global Navigation Satellite Systems*), WLL (*Wireless Local Loop*), WLAN (*Wireless Local Area Network*) y GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), generó una necesidad de miniaturización de las estructuras utilizadas en la comunicación y, conjuntamente con la demanda en el sector aeroespacial continúan manteniendo el área de antenas de microcinta en gran expansión.

Dentro de las principales ventajas, comparadas a antenas microondas podemos citar [POZ1992], [SCH1995], [GARG2001]:

- Estructura compacta, leve y volumen reducido.
- Configuración de perfil plano que pueden ser adoptados a la superficie de montaje.
- Producción menos compleja y de costo reducido, debido a las técnicas de circuito impreso utilizada en su fabricación.
- Alta versatilidad para producir una grande variedad de patrones de radiación y polarización, dependiendo del modo de alimentación y del formato particular del elemento conductor utilizado.
- Las líneas de alimentación y circuitos de acoplamiento de impedancia pueden ser fabricadas simultáneamente con la estructura de la antena.

No obstante, existen algunas desventajas asociadas a este tipo de antena que incluyen [POZ1992], [GARG2001]:

- Ancho de banda angosto (típicamente 1 a 3 %).
- Baja ganancia ($\sim 6\text{dBi}$).
- Posibilidad de excitación de ondas de superficie y consecuentemente disminución de la eficiencia.
- Baja capacidad de manejo de potencia, debido a las propias características de la estructura de la microcinta.

Grandes partes de esas desventajas pueden ser minimizados a través de técnicas de fabricación. Por ejemplo, la baja ganancia puede ser superada a través de arreglos de antenas de microcinta, y con aumento en la espesura del sustrato es posible aumentar el ancho de banda.

Algunas aplicaciones de antenas de microcinta son [POZ1992], [GARG2001]:

- Comunicaciones vía satélite.
- Telemetría de misiles.
- Sensoramiento remoto;
- Construcción de radiadores biomédicos.

1.3.1 Técnicas de alimentación de antenas patch

La estructura de antenas de microcinta posee elementos radiantes sobre el sustrato dieléctrico, y estos pueden ser alimentados por líneas de microcinta, por cables coaxiales o por acoplamiento electromagnético. En la literatura [BAL1997], están descritas varias técnicas de alimentación de una antena de microcinta, y los más destacados se describen a continuación.

1.3.1.1 Alimentación por conector coaxial

El acoplamiento de impedancia a través de un conector coaxial es uno de los mecanismos más tradicionales y populares para alimentación de antenas de microcinta. Este método consiste en hacer que el *pin* del cable coaxial alimente directamente al radiador, mientras que la parte negativa de este se conecta al plano a tierra de la antena microcinta. Es uno de los métodos más comunes de alimentación para antenas de microcinta; sin embargo, presenta un grado de dificultad puesto que el *pin* del conductor del cable coaxial debe perforar el sustrato y estar soldado a la antena para su correcto funcionamiento

La figura 1-5 presenta este tipo de alimentación. La impedancia depende de la posición de la sonda en relación con el radiador de tal forma que colocándola correctamente generará un mejor acoplamiento.

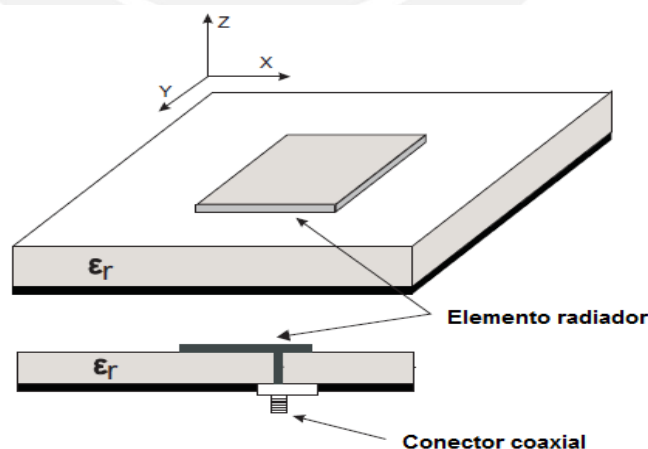


FIGURA1-5: ANTENA DE MICROCINTA CON FORMATO RECTANGULAR ALIMENTADO POR CONECTOR COAXIAL

Fuente: "Antena de microcinta con conector coaxial" [BAR2007]

Entre las ventajas que se pueden utilizar con el conector coaxial, están la facilidad de construcción y reducción del área de la antena. La principal desventaja es el surgimiento de inductancias producidas por el conector coaxial, lo que dificulta el acoplamiento de impedancia de la antena y reduce el ancho de banda. Esta inductancia es mayor en substratos más gruesos, pues el conector coaxial necesita tener una longitud mayor para atravesar el substrato.

1.3.1.2 Alimentación por línea de microcinta

Es el método más simple para alimentar una antena planar y será la adoptada en la presente tesis.

Una línea de transmisión construida en microcinta está constituida por una cinta conductora separada del plano a tierra por una capa dieléctrica, como se muestra en la figura 1-6. La figura 1-7 presenta la configuración de las líneas de campo eléctrico y de campo magnético en la microcinta. Como puede ser observado, parte de las líneas de campo están confinadas dentro del dieléctrico y se extiende por encima del substrato.

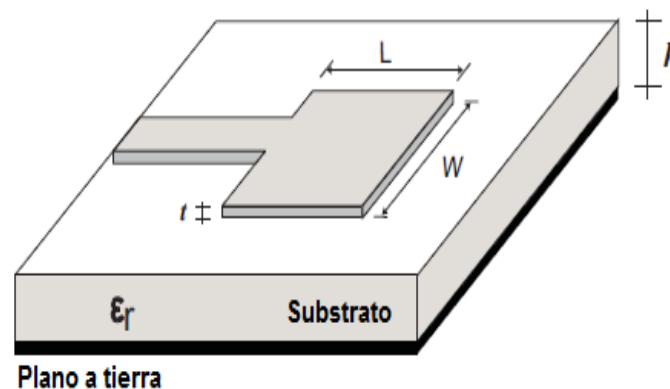


FIGURA1-6: ANTENA DE MICROCINTA RECTANGULAR ALIMENTADA POR UNA LÍNEA DE MICROCINTA

Fuente: "Antena microcinta alimentada por línea de microcinta" [BAR2007]

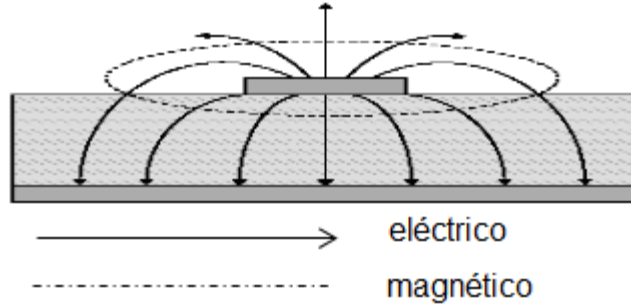


FIGURA1-7: LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO EN LA ANTENA PATCH

Fuente: [BAR2007]

Frente a la necesidad de antenas con dimensiones reducidas, la utilización de esta técnica de alimentación puede ser perjudicial, pues la superficie de la antena aumenta debido a las dimensiones de la línea de alimentación. Debido a la alta impedancia en la extremidad del elemento conductor, alcanzar el acoplamiento de impedancia entre la línea de alimentación y el elemento conductor no es insignificante. Para intentar reducir el costo de esta tarea, variaciones de este método son utilizados tales como la implementación de un transformador $\lambda/4$ o método "inset".

Las dimensiones de las líneas microcintas serán calculadas por medio de las siguientes expresiones:

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \ln\left(\frac{8h}{W_e} + 0,25 \frac{W_e}{h}\right) & \text{para}(W/h \leq 1) \\ \frac{376,7}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \left[\frac{W_e}{h} + 1,393 + 0,667 \ln\left(\frac{W_e}{h} + 1,444\right) \right]^{-1} & \text{para}(W/h > 1) \end{cases} \quad (1.1)$$

Siendo:

$$\frac{W_e}{h} = \frac{W}{h} + \frac{\Delta W}{h}$$

y

$$\frac{\Delta W}{h} = \begin{cases} \frac{1,25}{\pi} \frac{t}{h} \left(1 + \ln \frac{4\pi W}{t}\right) & (W/h \leq 1/2\pi) \\ \frac{1,25}{\pi} \frac{t}{h} \left(1 + \ln \frac{2h}{t}\right) & (W/h > 1/2\pi) \end{cases} \quad (1.2)$$

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_{r+1}}{2} + \frac{\epsilon_{r-1}}{2} F(W/h) - Q \quad (1.3)$$

$$F(W/h) = (1 + 10h/W)^{-1/2}$$

$$Q = \frac{\epsilon_r - 1}{4.6} \frac{t/h}{\sqrt{(W/h)}} \quad (1.4)$$

Dónde: Z_0 es la impedancia característica de la línea de transmisión y ϵ_{re} es la constante dieléctrica efectiva y W_e es el ancho efectivo de la línea de transmisión.

1.3.1.3 Alimentación por acoplamiento electromagnético por línea de microcinta

Los dos casos anteriores, alimentación por línea de microcinta y por conector coaxial, poseen asimetrías inherentes que generan modos de orden más alto, generando así radiación de polarización cruzada. Para evitar esos problemas, métodos de alimentación sin contacto físico entre la alimentación y el elemento conductor fueron introducidos como es el caso de acoplamiento electromagnético por línea de microcinta. En este tipo de alimentación, el elemento conductor no entra en contacto con la línea de microcinta que irá a alimentar la antena. Por tanto, se utilizan dos capas de substrato con el elemento conductor en la camada superior y la línea de microcinta en la camada inferior, como es presentado en la figura 1-8.

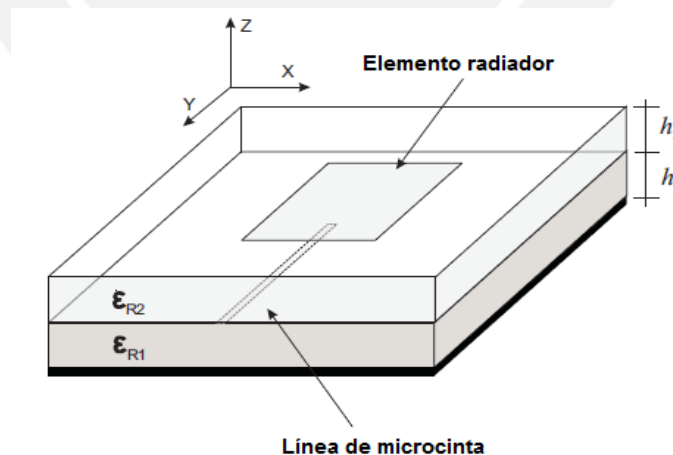


FIGURA1-8: ANTENA MICROCINTA CON FORMATO RECTANGULAR ALIMENTADA A TRAVÉS DE ACOPLAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO

Fuente: “Antena microcinta alimentado por acoplamiento electromagnético” [BAR2007]

La utilización de la alimentación vía acoplamiento electromagnético permite, a través de una combinación de alturas (h) y constantes dieléctricas (ϵ_R) de los substratos, un incremento en ancho de banda, además facilita que la línea de alimentación y el elemento conductor sean optimizados de forma independiente. Por estar entre substratos dieléctricos diferentes, la radiación proveniente de la línea de alimentación perturba mínimamente el diagrama de radiación de la antena. Por otro lado, esta técnica es de difícil fabricación que el de las anteriores, debido a que su estructura se encuentra en múltiples substratos.

1.4 Substrato para antenas de microcinta

Ciertamente, la permitividad eléctrica del material a ser utilizado como substrato de una antena de microcinta es el parámetro físico de mayor influencia en las frecuencias de resonancias. Actualmente, una variedad muy amplia de placas para microondas, de bajas pérdidas y tasas elevadas de homogeneidad e isotropía, se encuentra a disposición de los proyectistas. Los más comunes poseen permitividades relativas que varían de 2 a 10.

Además de la frecuencia de resonancia, la banda de paso y las dimensiones físicas de la antena está se ve fuertemente afectado por la elección de la permitividad del substrato. Si la aplicación necesita antenas de dimensiones reducidas, una posible solución es el empleo de substratos con permitividad elevada, pues habrá una mayor concentración de líneas de campo en el material que en el aire. Por otro lado, disminuyendo el valor de la permitividad relativa, se aumenta las dimensiones de la antena. El problema de las ondas superficiales en la estructura también debe ser llevado en cuenta, propiciando un cuidado extra al momento de escoger el substrato, eso porque los fenómenos de ondas superficiales dependen claramente del substrato.

De esa manera, es evidente el compromiso entre el tipo de substrato con las dimensiones y características de funcionamiento de los prototipos.

Capítulo 2

Desarrollo de Antenas para Banda Ancha

2.1 Introducción

Desde hace varios años, las comunicaciones inalámbricas han estado creciendo muy rápidamente y se tendrá esta tendencia por varios años más. Con el incremento en las comunicaciones inalámbricas, se ha aumentado el número de usuarios existentes y con ello la delimitación del ancho de banda a utilizar es cada vez más restringida. Por ello, el desarrollo de antenas de banda ancha es necesario para satisfacer los requerimientos de tecnologías actuales y que puedan operar en varias bandas de frecuencia.

Existentes diferentes tipos de antenas planares con características de banda ancha que sufren una variedad de desventajas para el uso de aplicaciones actuales. Por ejemplo, las antenas *patch* son típicamente de banda angosta, en la orden de 2% de ancho de banda [BAL1997], pero se fueron adaptando muchas técnicas para aumentar el ancho de banda, pudiendo alcanzar a un 15%, utilizando por ejemplo substratos en

varias capas [POZ1992]. Pero cabe resaltar que tales técnicas enriquecen el diseño aumentando la complejidad de la antena, además de su costo.

Además, la dirección del haz principal del patrón de radiación de una antena *patch* está orientada en dirección *broadside* cuando la dirección deseada para esta investigación es *end fire*. Otros candidatos de antenas con radiación *end fire* son las antenas Vivaldi y antenas de ranura lineal cónica (LTSA) que pueden alcanzar un amplio ancho de banda. Desafortunadamente estas antenas son de gran dimensión y sufren la excitación de modos no deseados en el sustrato. Además, la respuesta en frecuencia de una antena de ranura cónica se ve afectada por la complejidad de la red de alimentación, por lo tanto hace que la antena sea compleja de fabricar y posee degradación en el patrón de radiación.

Una mejora introducida por la antena quasi Yagi, que es la adaptación de la clásica configuración Yagi Uda, para operar a frecuencias de microondas. Además introduce la compacidad de antenas de tipo resonantes y posee características de banda ancha. Esta antena con características de banda ancha será evaluada en la presente tesis.

2.2 Antenas tipo Yagi

2.2.1 Antenas Yagi Uda

La antena conocida como Yagi Uda, resulta un dispositivo radiante muy útil en un amplio rango del espectro. Así, se utiliza en HF (3 – 30MHz), VHF (30 – 300MHz), y en UHF (300 – 3000MHz). Dicha antena consiste en un determinado número de dipolos. Uno de dichos dipolos es directamente alimentado por una línea de transmisión, mientras que los otros actúan como radiadores parásitos cuyas corrientes son inducidas por acoplamientos mutuos. El elemento alimentado más común en las antenas Yagi Uda, es el dipolo plegado. Dicha antena es diseñada para trabajar únicamente como un *array endfire*. Esta característica se consigue disponiendo los elementos parásitos en la dirección del haz principal, actuando como elementos directores, mientras que los elementos de la parte trasera de la antena, lo hacen como reflectores.

Las antenas Yagi Uda son extensamente utilizadas en los receptores de TV, por lo que es ampliamente conocida. Un esquema de dicha antena puede observarse en la figura 2-1.

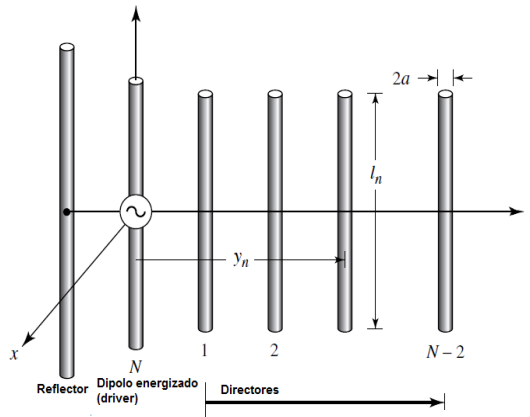


FIGURA 2-1: ESQUEMA DE UNA ANTENA YAGI UDA CON UN ELEMENTO REFLECTOR, UN ALIMENTADOR Y DIRECTORES

FUENTE: "Configuración de antena Yagi Uda" [BAL1997]

En la práctica, una antena Yagi Uda tiene a lo sumo dos reflectores, dado que el efecto del mismo está concentrado básicamente en el elemento más cercano al alimentador.

Aun así, pueden conseguirse importantes mejoras si se añaden elementos parásitos al *array*. La adición de elementos directores significará una mejoría en las características de la antena, hasta un cierto límite práctico, a partir del cual, no se consiguen mejoras sustanciales. Esto viene determinado por la progresiva reducción de la magnitud de las corrientes inducidas en los elementos más lejanos al alimentador. Normalmente, se dispone un número de entre 6 y 12 elementos parásitos.

Las características de radiación que son de interés en una antena Yagi Uda son principalmente [BAL1997]:

- Ganancia.
- Impedancia de entrada.
- Ancho de banda.
- Relación *front to back*.
- Relación lóbulo principal a secundario.

Las dimensiones de los directores y reflectores, así como sus correspondientes espaciados, determinan las características óptimas de la antena. Durante años, los diseños óptimos se han conseguido de forma experimental. Pero hoy en día, debido a los avances en tecnología informática, se han desarrollado técnicas numéricas, que han sido utilizadas para inferir las dimensiones de la antena para conseguir un comportamiento óptimo. Normalmente, esta antena presenta una baja impedancia de entrada, así como un ancho de banda relativamente bajo (cerca de un 2%). Así, mejoras en estos parámetros son posibles siempre a costa de empeorar otros, como la ganancia. Por lo que en la práctica, se trata de llegar a un compromiso que dependerá de las especificaciones requeridas. Se pueden conseguir valores de unos 15 dB para la relación *front to back*, pero una vez más, se vería perjudicada otra característica de la antena.

A la hora de diseñar una antena Yagi Uda, deberemos prestar atención, principalmente, a tres elementos para conseguir las características deseadas: la relación reflector-alimentador, el alimentador y los elementos parásitos. Numérica y experimentalmente ha sido demostrado que el espaciado y el tamaño del reflector no tiene un efecto apreciable, en la ganancia de la antena en la dirección del haz principal, pero sí lo tiene en el valor de la ganancia en la dirección trasera, así como en la impedancia de entrada. Así, dicho parámetro puede ser utilizado para ajustar dichos parámetros de la antena sin afectar de forma significativa la ganancia principal. El tamaño del alimentador, tiene también poco efecto sobre la ganancia en la dirección del haz principal, pero sí tiene efectos apreciables en la ganancia en la dirección trasera y en la impedancia de entrada. Dicho parámetro, por lo tanto, es utilizado para ajustar la impedancia de entrada, haciéndola real (elemento resonante).

La antena Yagi Uda resulta simple de diseñar para un número reducido de elementos (5- 6), pero dicho diseño se vuelve más complejo conforme aumenta la cifra de elementos. Con frecuencia, un número elevado de éstos se introduce para conseguir una elevada directividad.

2.2.2 Antenas quasi Yagi

Hasta ahora, hemos analizado el comportamiento que tiene una antena Yagi Uda en su versión no plana. Los dispositivos de radiofrecuencia precisan antenas construidas con

tecnología plana, dadas las características de dichos dispositivos. En este trabajo se ha tenido en cuenta este hecho, lo que unido a que las antenas planas resultan más sencillas de construir y a un menor precio, haciendo que el análisis se centre exclusivamente en antenas planares.

Por lo tanto, resulta necesario poder transportar las características de una Yagi Uda no plana, a otra construida en tecnología plana.

En 1997, el grupo de laboratorio de microondas de la Universidad de California estaba trabajando en una transición entre líneas CPS (*Coplanar Stripline*) en una guía de onda para aplicaciones VM DP (*Velocity Matched Distributed Photodetector*) de banda ancha. En ese trabajo se estaba usando un LTSA (*Linear Tapered Slot Antenna*), pues la misma posee un ancho de banda considerable, pero los problemas técnicos comenzaron a aparecer en el proyecto.

Considerando una nueva alternativa, se optó por adopción de un dipolo como elemento radiador, el llamado *driver* de la antena, pues la línea CPS podía excitarlo con éxito. El nuevo problema es que el dipolo es un radiador bidireccional, así su uso en la transición se torna inviable, pero con el uso adecuado de un director y un reflector, la dirección del patrón de radiación puede ser guiada solamente en una dirección. Entre tanto existieron también problemas en la implementación del elemento reflector en la estructura, resultando como una nueva alternativa el uso de un plano a tierra, pero ahora de forma truncada, como elemento reflector.

De esta forma se estaba creando un nuevo diseño de antena planar, llamada quasi Yagi, debido a su semejanza clásica a la antena Yagi Uda.

La característica principal introducida por este diseño es el uso del plano a tierra truncado en la red de alimentación como el elemento reflectante. Esta característica elimina la necesidad de un dipolo reflector adicional, resultando un diseño compacto ($< \lambda_0/2$) que a la vez proporciona compatibilidad con circuitos tipo microcinta.

La antena quasi Yagi, que es presentada en este trabajo posee características de banda ancha y radiación *end fire* a 2.4 GHz en la banda ISM. El diseño planar de la antena quasi Yagi son convenientes para aplicaciones actuales como sensores inalámbricos en aviones, sistemas de radares y arreglos de adaptación para las comunicaciones con haz múltiple.

Una vista en 3D de la antena quasi Yagi es mostrada en la figura 2-2, en la cual podemos notar sus elementos principales: la línea de alimentación, el *balun*, la línea CPS, *driver* (dipolo), director y el reflector.

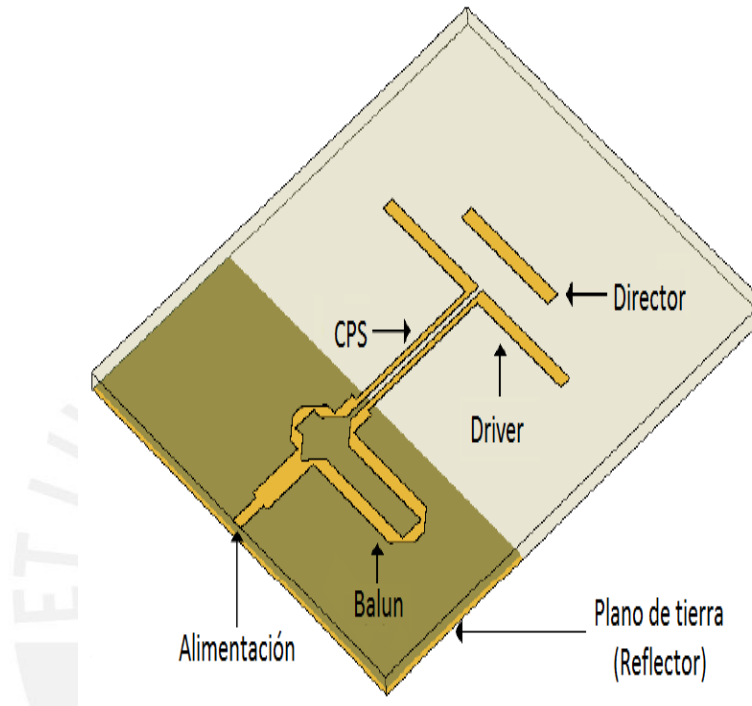


FIGURA 2-2: ANTENA QUASI YAGI

FUENTE: "Configuración de la antena quasi Yagi" [MAR2001]

2.3 Diagrama de flujo del proyecto de la antena quasi Yagi

La figura 2-3 muestra el diagrama de flujo, que sirve como un rápido diseño *guideline* para proyectos de antenas quasi Yagi.

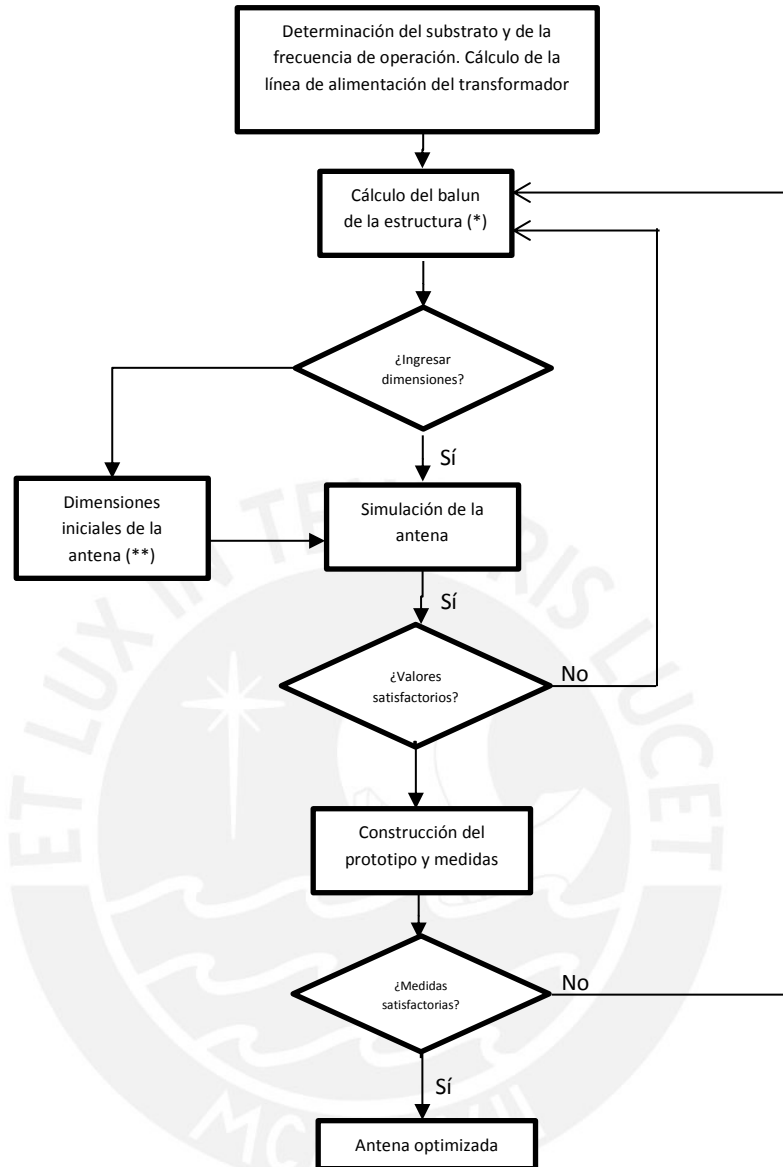


FIGURA 2-3: DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL PROYECTO DE ANTENA QUASI YAGI

FUENTE: [BAR2007]

La observación (*) representa que debemos calcular el valor del *balun*, teniendo en vista un retardo de 180° en uno de los brazos de la estructura para realizar el acoplamiento en modo impar que será transmitido a la línea CPS, y que alimentará al *driver* de la estructura.

La observación (**) consiste en colocar valores iniciales de longitud de onda del *driver*, del director y las distancias entre ellos. Son dados por: la longitud del *driver* λ_g , y los

valores de $\lambda_g/2$ y de $\lambda_g/8$ para las distancias entre el *driver* y el reflector y entre el *driver* y el director, respectivamente.

Por medio de esta visión rápida y global del proceso del proyecto y optimización de la antena quasi Yagi es presentado finalizando el estudio y la implementación de la misma.



Capítulo 3

Arreglos de antenas para Beamforming

3.1 Arreglo de antenas

Un arreglo de antenas está constituido por varias antenas que trabajan para el mismo sistema y que están colocadas con una cierta formación dependiendo de la función que este arreglo vaya a desempeñar y al patrón de radiación que se quiera obtener.

Con un arreglo de antenas se puede considerar cada una de las antenas pertenecientes a este arreglo como un punto de radiación individual, que unidos, darán el efecto deseado.

Los arreglos de antenas se utilizan en diversas aplicaciones entre ellas radioastronomía, telecomunicaciones satelitales, espacial, terrestre y en radares.

Se sabe que las antenas convencionales tienen un patrón de radiación fijo que depende de la estructura de la misma. Para modificar la directividad de una antena será necesario cambiarla de posición o de ángulo, con esto, por ejemplo se lograría

enfocar un objetivo en movimiento el cual es necesario mantenerlo dentro del lóbulo principal del patrón de radiación.

El que se tengan muchas señales de onda provenientes de distintas direcciones, con distintas intensidades de onda, con diferente polarización y con diferente frecuencia son problemas que pueden ser resueltos de mejor manera utilizando arreglos de antenas en vez de una única antena trabajando de forma separada [BAL1997].

Varias antenas interconectadas entre sí producen un patrón de radiación específico. Este patrón de radiación depende de la posición de cada una de las antenas que lo conforman, su orientación, la magnitud y fase de las corrientes que las excitan.

Las señales introducidas a cada elemento radiante, o antena, por medio de las líneas de transmisión, pueden ser modificadas mediante atenuadores (para la magnitud) y por desplazadores o variadores de fase (para la fase).

3.1.1 Elementos de un arreglo

Un arreglo de antenas, además de las antenas que lo conforman, está hecho de diferentes elementos que, en conjunto, logran el comportamiento deseado para ese arreglo. La estructura general de un arreglo consta, entre otros, de los siguientes elementos [COL1985]:

- *Red de alimentación*: provee a los diferentes atenuadores la energía para que, luego de ser modificada, sea radiada. Los acopladores que envían la energía para una u otra dirección tienen que tener acople de impedancias y deben estar aislados para evitar alguna reflexión que se pueda dar debido al coeficiente de reflexión que tienen los elementos del arreglo.
- *Variadores de fase*: modifican la fase de la señal recibida desde la red de alimentación.
- *Un procesador digital de señales*: realiza los cálculos necesarios para establecer la atenuación y la fase de cada elemento del arreglo según se necesite el patrón de radiación.

- *Antenas*: elemento de interfaz entre un circuito eléctrico y el espacio físico que genera ondas electromagnéticas a partir de una señal proveniente del circuito y viceversa.

3.1.2 Factor de arreglo

Un concepto básico a la hora de tratar arreglos de antenas es el de factor de arreglo. El factor de arreglo es la suma de las influencias de cada uno de los elementos del arreglo [FAR2007].

Para el arreglo de la figura 3-1, se tiene que el factor de arreglo está dado por la suma de las respuestas de las antenas con su respectiva amplitud $\{I_0, I_0, \dots\}$ y cambio de fase $\{e^{j\zeta_0}, e^{j\zeta_1}, \dots\}$ de las corrientes introducidas en la línea de transmisión de cada elemento. Así se tendrá que el factor de arreglo para este sistema será:

$$AF = I_0 e^{j\zeta_0} + I_1 e^{j\zeta_1} + I_2 e^{j\zeta_2} + \dots$$

Donde ζ_0, ζ_1, \dots son las fases de la onda plana entrante en el elemento localizado e identificado por 0, 1, 2, ...

Para analizar un poco la influencia que puede tener un elemento en la formación del patrón de radiación de un arreglo entero se puede analizar un arreglo de dos elementos como se muestra en la figura 3-2. Para este caso, los dos elementos están distanciados $\lambda/2$, siendo λ la longitud de onda de la señal, y las corrientes y fases de excitación son iguales. Si se analiza el sector derecho del arreglo se tendrá que la onda del elemento derecho tendrá un desfase de 90° con respecto a la onda emitida por el elemento de la izquierda produciendo una cancelación en las señales; de igual forma sucede del lado izquierdo del arreglo. Contrario a lo anterior, sucede a lo largo del eje x donde las ondas llegan siempre en fase y con la misma magnitud, produciendo un campo total del doble del emitido por un solo elemento.

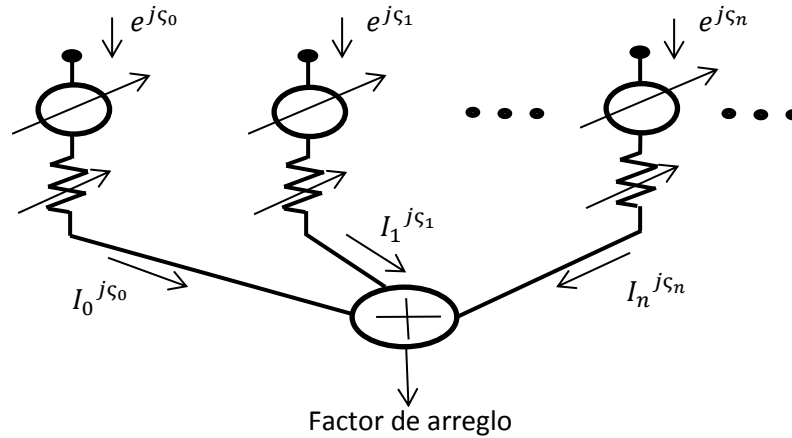


FIGURA 3-1: CONFIGURACIÓN EQUIVALENTE PARA DETERMINAR EL FACTOR DE ARREGLO

FUENTE: [STU1998]

El análisis anterior hecho por inspección sirve como muestra de cómo los patrones de radiación de un elemento influyen sobre otros y así forman un patrón de radiación general para el arreglo. Para el caso anterior, lo único que cambiaba para cada elemento es su posición en el espacio, pero en un arreglo mucho más complejo, los desfases entre los elementos en las ondas de salida y la variación en la atenuación de la corriente de excitación, según estos sean tratados, se logrará un patrón específico. De manera general se puede decir que, para un patrón de radiación, el factor de arreglo está dado por la siguiente ecuación.

$$AF = \sum_{n=0}^{N-1} I_n e^{j\beta Z_n \cos \theta} \quad (3.1)$$

Donde I_n es la intensidad de la corriente de excitación de cada uno de los elementos del arreglo, Z_n es la posición espacial del n-ésimo elemento a partir del origen a lo largo del eje en el que está el arreglo, θ es el ángulo de incidencia de la onda entrante con respecto al eje del arreglo y β es una constante de fase para la onda plana emitida o recibida por el arreglo.

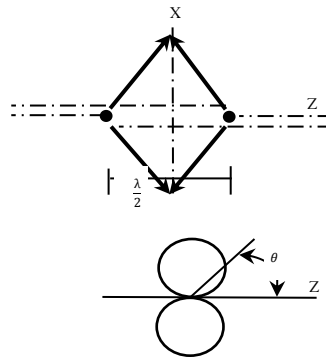


FIGURA 3-2: ARREGLO DE DOS ELEMENTOS

FUENTE: [STU1998]

3.1.3 Tipos de alimentación de un arreglo

Existen tres principales formas de estructurar un arreglo según su manera de alimentar los elementos [HUA1989]:

- Alimentación paralela: este arreglo observado en la figura 3-3 (a) tiene el camino hacia cada elemento del mismo largo y por ende la amplitud y fase de las corrientes de excitación serán iguales. Para lograr variaciones en la amplitud y fase de las corrientes es necesario utilizar desplazadores de fase y atenuadores.
- Alimentación serie: observado en la figura 3-3 (b), este es un arreglo fácil de construir pero difícil de diseñar. La onda viaja a través de la línea de transmisión y cada elemento irá atenuando cierta potencia en forma de radiación. Se tiene una impedancia de acople para evitar que alguna señal se refleje. La fase relativa entre cada par de elementos contiguos es determinada por la longitud eléctrica de la línea de transmisión, la cual depende de la frecuencia de la señal, y por los efectos de acople entre cada elemento. La fase de cada señal emitida por cada antena es controlada por la frecuencia aplicada a la línea de transmisión.
- Alimentación en el espacio: este estilo de alimentación de antenas se observa en la figura 3-3 (c). Se emplea una antena primaria que emite una radiación que

es captada por las antenas receptoras. Las diferencias entre las fases se da por la diferencia entre los caminos que cada onda debe tomar entre la antena primaria y cada una de las antenas receptoras. La amplitud en las corrientes de cada antena receptora es determinada por las propiedades de radiación de la antena primaria. Además, las antenas receptoras pueden estar conectadas a las antenas secundarias por medio de atenuadores y desplazadores de fase.

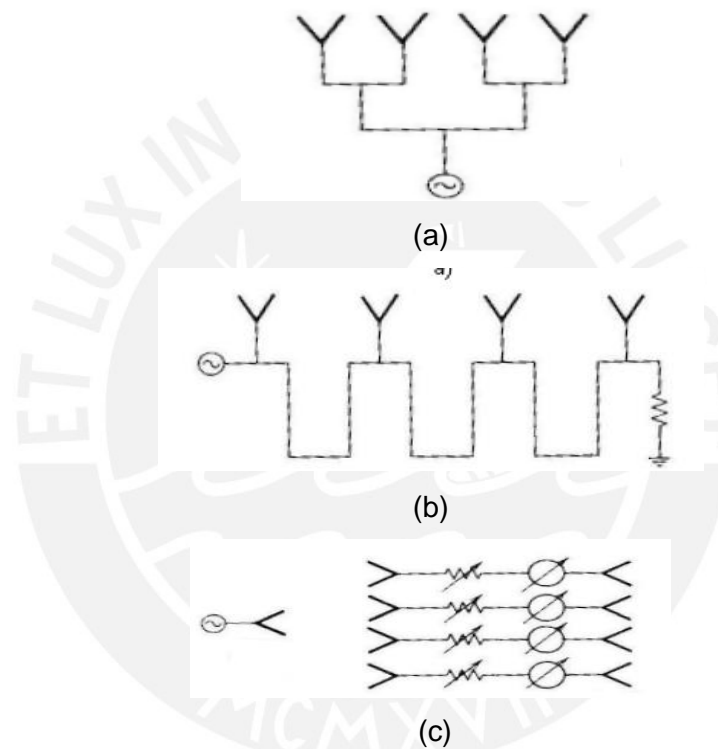


FIGURA 3-3: (a) ALIMENTACIÓN PARALELA (b) ALIMENTACIÓN EN SERIE (c) ALIMENTACIÓN EN EL ESPACIO

FUENTE: [STU1998]

3.2 Arreglo de antenas quasi Yagis

Los sistemas inalámbricos de las próximas generaciones exigirán antenas con pequeñas dimensiones, con ganancia razonable y amplio ancho de banda, ofreciendo la posibilidad de operar en varias bandas. Para cumplir con estos requisitos necesarios

la antena quasi Yagi es una seria candidata para este tipo de aplicaciones ya que satisface los requisitos anteriores con méritos [DEA2000].

Un elemento simple quasi Yagi operando solo en el espacio libre, presenta un amplio ancho de banda, alta eficiencia, moderada ganancia, entre otras características. Cuando examinamos su patrón de radiación, observamos una excelente estabilidad sobre toda la banda de operación de frecuencias, además de su amplio haz direccional, formando una situación ideal para aplicaciones en sistemas con haces direccionales y patrones de radiación configurables.

Todas esas favorables condiciones muestran que la antena quasi Yagi, posee un gran potencial en aplicaciones en *phased array*, *switched* y consecuentemente vastas aplicaciones en sistemas adaptativos [KAN2000].

En muchas aplicaciones, es necesario usar antenas con características de directividad acentuadas y controlables, como en el caso de antenas con reflectores, el diagrama de radiación de un simple elemento es relativamente disperso y posee bajos valores de directividad o ganancia.

Una forma de obtener mayor directividad es adicionar múltiples elementos a la antena original, creando una nueva estructura, denominada arreglo de antenas. En muchos casos, los elementos de un arreglo son idénticos, por cuestión de simplicidad y practicidad, pudiendo presentar varios tipos y formas (aberturas, espiras, etc).

Varios estudios indican que el uso apropiado de arreglos mejora el desempeño de los sistemas de comunicaciones inalámbricos, pues aumenta la calidad de la señal recibida (mayor directividad) y la supresión de señales interferentes. Con eso, la capacidad del tráfico del sistema aumenta y mejora el uso del espectro disponible.

La antena preparada para esta investigación requiere de una máxima radiación hacia una dirección en particular, el eje de la antena.

El campo total de un arreglo es determinado por la suma vectorial de los campos irradiados por cada elemento individualmente. Se asume que la corriente en cada elemento es la misma para cada elemento aislado, mas esto depende de la separación entre los elementos. Para generar diagramas de radiación más directivos, es necesario que los campos formados por los elementos del arreglo interfieran constructivamente

en las direcciones deseadas y que interfieran destructivamente en el espacio libre, En un arreglo de elementos idénticos, existen algunas características que deben ser atendidas para formar el diagrama total del arreglo tales como [BAL1997]:

- Configuración geométrica de todo el arreglo (linear, circular, rectangular, espiral, etc).
- Separación relativa entre los elementos.
- Excitación de amplitud de cada elemento.
- Excitación de fase de cada elemento.
- Diagrama de radiación relativo de cada elemento.

El caso más simple y práctico de arreglos es formado por elementos linealmente. Por ello, en este trabajo será estudiado el arreglo lineal de elementos, utilizando como elemento las antenas quasi Yagis.

3.3 Antenas inteligentes

Se llama antena inteligente al sistema o arreglo de antenas que puede modificar su patrón de radiación según convenga. Una antena inteligente por sí sola no puede ser inteligente, la inteligencia se le atribuye al tipo de arreglo de antenas en el cual está compuesta y al procesamiento digital de la señal enviada o recibida, el cual es el que logra esta modificación en el patrón de radiación [ALB2007].

La antena inteligente modifica su patrón de radiación de manera que el lóbulo más grande o de mayor potencia esté dirigido hacia el objetivo mientras que existan bajas o nulas intensidades de radiación o recepción en las direcciones donde se encuentran las señales no deseadas como las de interferencia. A su vez la forma de estos lóbulos puede ser modificada en muchas ocasiones haciendo que este sea más dirigido, es decir que cubra en la medida de lo posible únicamente la región donde se encuentra el receptor o emisor con el que se está comunicando.

El hecho de que la antena inteligente logre modificar su patrón de radiación permite un enorme ahorro de energía tanto en el receptor como en el emisor. Al estar el lóbulo

principal dirigido únicamente hacia el objetivo produce que el alcance de esta antena sea mucho mayor o bien, estando a la misma distancia, con el uso de una antena inteligente se logra reducir la potencia necesaria para enviar alguna señal produciendo un ahorro considerable en la energía utilizada en este tipo de comunicaciones inalámbricas.

3.3.1 Utilidad

Originalmente las antenas inteligentes fueron utilizadas en el ámbito de la guerra. La directividad que podían lograr este tipo de antenas daba un gran nivel de seguridad ante los enemigos que pudieran estar intentando interferir con las señales de comunicación enviadas. La potencia disminuida o nula que una antena emisora enviaba hacia las direcciones donde no estaba el receptor deseado hacían casi imposible interceptar esta señal y de esta forma algunos ejércitos protegían su información [MOH2002].

Desde hace varios años, las comunicaciones inalámbricas han estado creciendo muy rápidamente y se tendrá esta tendencia por los varios años más. Con el incremento en las comunicaciones inalámbricas, se ha aumentado el número de usuarios existentes y con esto la delimitación del ancho de banda a utilizar es cada vez más restringida. Con el uso de las antenas inteligentes, se logra el aumento en la cantidad de usuarios que utilizan algún servicio ya que se pueden estar manejando diferentes usuarios a la misma frecuencia pero localizados en diferentes lugares [LIU2003].

3.3.2 Ventajas y desventajas

La principal ventaja del uso de las antenas inteligentes es la capacidad que se obtiene de modificar el patrón de radiación. Con esto se logra dirigir los lóbulos principales hacia un objetivo específico mientras que los *nulls* se pueden orientar hacia las señales de interferencia o hacia donde se encuentren las principales fuentes de ruido. Los múltiples lóbulos secundarios permiten también tomar en cuenta las ondas de la señal deseada que han sido desviadas por las características del canal de transmisión [LIB1999].

Con la ventaja directa de modificar el patrón de radiación se logran otras ventajas secundarias como por ejemplo:

- Se aumenta el área de cobertura: debido a que toda la potencia de la antena está dirigida, el alcance utilizando la misma potencia que en una antena isotrópica es mucho mayor. Con el aumento del área de cobertura se puede utilizar una menor cantidad de estaciones de transmisión base y con esto ahorrar costos en este aspecto.
- Reducción de interferencia: mediante los *nulls* las señales de interferencias pueden ser ignoradas total o parcialmente por el sistema.
- Se aumenta la direccionalidad: mediante la modificación del lóbulo se logra apuntar más directamente el objetivo aunque este se encuentre en movimiento.

Aparte de estas ventajas por la modificación del patrón se encuentran otras que están ligadas al procesamiento de las señales. Unas de esas ventajas son el aumento del rechazo de la interferencia co-canal, la reducción de los retardos en las señales enviadas, el uso de las mismas frecuencias de transmisión y recepción para distintas señales, el mejoramiento de la capacidad de la señal de penetrar edificios y otros objetos que puedan obstaculizar el camino de la señal, el incremento de la cantidad de datos que se pueden transmitir y el incremento de la capacidad global del sistema.

La desventaja que se tienen con las antenas inteligentes es la complejidad que involucra el uso de estas. Los procesadores de señales deben ser de última generación para evitar retardos que pueden ser totalmente perjudiciales cuando se trabaja en el área de telecomunicaciones y los componentes utilizados deben ser los mejores que existan en el mercado para evitar pérdidas y tener la máxima exactitud posible. Como consecuencia de la complejidad de esta tecnología, se tiene el alto costo de implementar un sistema de antenas inteligentes, el cual llega a ser el impedimento principal para que se decida utilizar este tipo de antenas.

3.4 Tecnología Beamforming

Una de las principales funciones de una antena inteligente es la de generar automáticamente los haces de su patrón de radiación según sea la necesidad. La generación de lóbulos de un patrón de radiación se conoce como *beamforming* y este

se puede hacer automáticamente mediante técnicas de procesamiento digital de señales.

Por medio del *beamforming*, la señal deseada es cubierta por un lóbulo del patrón de radiación mientras que las demás señales y las interferencias son rechazadas por los *null*, que significa que en la dirección de la interferencia no habrá ningún haz de radiación y por lo tanto la señal indeseada no es captada. Este proceso realiza, por medio de variaciones en las fases de las señales de los elementos del arreglo, interferencias aditivas para las señales deseadas y sustractivas para las indeseadas. Con un arreglo de antenas se puede lograr hacer varios lóbulos que cubren ciertas zonas angulares por medio del *beamforming*.

3.4.1 Formación del haz digitalmente

En la última década, se ha empezado a desarrollar mucho las técnicas digitales para la formación de los haces del patrón de radiación de una antena. La tecnología digital facilita el trabajo con antenas debido a la flexibilidad, confiabilidad y repetitividad que ofrece. La manera en que se trabaja con tecnología digital en antenas es que la señal recibida es digitalizada y luego las amplitudes y fases de cada elemento son multiplicadas por los pesos complejos asignados. Posteriormente, se suman digitalmente las señales, obteniéndose la forma digital del haz la cual depende tanto de la forma del arreglo como de los pesos complejos asignados.

Algunas ventajas que se tienen al utilizar *beamforming* digital son:

- La dirección y forma del lóbulo puede ser cambiado muy rápidamente utilizando implementaciones digitales de los algoritmos para la formación de haces.
- Es posible formar varios lóbulos a partir de un único arreglo de antenas sin que afecten las restricciones de ortogonalidad de las señales.
- Los errores de fase y amplitud en cada canal receptor pueden ser caracterizados y corregidos lográndose un control de fase y amplitud de las señales muy preciso y con esto la precisión en la forma y amplitud del patrón de radiación.

En la presente tesis, se modificara las líneas de microcinta en la alimentación para poder realizar el desfasaje en la alimentación y así modificar el lóbulo principal del patrón de radiación.



Capítulo 4

Simulación, Implementación y Mediciones

4.1 Ambiente computacional

Para la simulación de todos los prototipos creados se han utilizado dos software de la compañía Agilent, llamados EMPro y ADS.

4.1.1 EMPro

Es una plataforma de software de diseño electromagnético en 3D, como paquetes de circuitos integrados de alta velocidad, antenas y arreglos con geometrías complicadas con diferentes tipos de alimentación. Permite crear y configurar rápidamente estructuras arbitrarias en 3D para luego ejecutar su análisis tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo. Presentan varias tecnologías de simulación entre ellos el Método de los Elementos Finitos (FEM) y Método de las diferencias finitas en el dominio de tiempo (FDTD).

En la presente tesis, se utilizó este software para calcular la pérdida de retorno, por ende la verificación del ancho de banda, la impedancia, el VSWR, la ganancia, directividad y el patrón de radiación.

4.1.2 ADS

Es una plataforma de diseño electrónico para Radio Frecuencia, microondas y aplicaciones digitales de alta velocidad, al igual que EMPro permite diseñar antenas, en dos dimensiones, por tanto es aplicable para realizar simulaciones de antenas planares. Presenta varias tecnologías de simulación entre ellos el Método de los Elementos Finitos (FEM). Se utilizó este software para calcular la distribución de campo electromagnético que se propaga en la antena planar.

4.2 Medición del sustrato a utilizarse

Una antena planar está hecha de una fina capa de un material aislante llamado sustrato dieléctrico. El sustrato dieléctrico es la base del circuito de microcinta, constituye un soporte estable para las líneas conductoras y los parches que conforman las conexiones, los resonadores y las antenas. La permitividad dieléctrica y grosor del sustrato determinan las características del circuito o la antena.

Para el cálculo de la permitividad del sustrato a utilizarse, se realizó la medición de una muestra del sustrato en el analizador de redes VNA, para la verificación de los parámetros S11 como se muestra en la figura 4-1. Para el cálculo de la permitividad se tiene que tener en cuenta la longitud del sustrato ($L=15.8$ mm) y las frecuencias de resonancia, que pueden ser visualizadas en la figura 4-2.

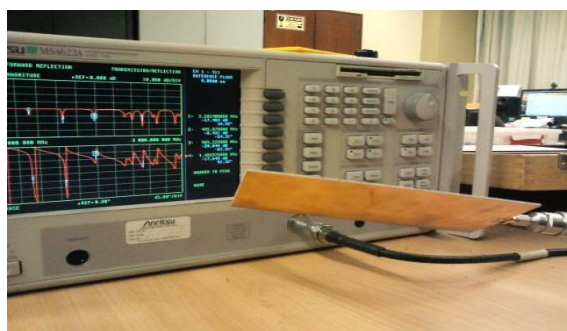


FIGURA 4-1: MEDICIÓN DEL SUBSTRATO EN EL ANALIZADOR DE REDES VNA

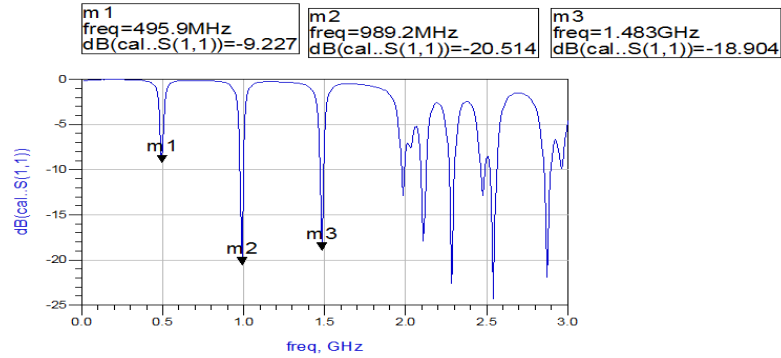


FIGURA 4-2: PÉRDIDA DE RETORNO PARA LA MEDICIÓN DEL SUBSTRATO.

FUENTE: Elaboración propia

De la figura 4-2, tomamos las tres primeras frecuencias de resonancia $f_{res1} = 495.9 \text{ MHz}$, $f_{res2} = 989.2 \text{ MHz}$ y $f_{res3} = 1.483 \text{ GHz}$.

Dónde:

$$L = n \left(\frac{\lambda}{2} \right) \quad (4.1)$$

$$L = n \left(\frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_r}} \right) \quad (4.2)$$

$$\epsilon_r = \left(\frac{n\lambda_0}{2L} \right)^2 = \left(\frac{nc}{2f_{res}L} \right)^2 \quad (4.3)$$

De la ecuación (4.3) podemos calcular el valor de la permitividad ϵ_r para la primera frecuencia de resonancia $f_{res1} = 495,9 \text{ MHz}$.

Donde $c = 3 \times 10^8$ y $n=1$

$$\epsilon_{r1} = \left(\frac{nc}{2f_{res}L} \right)^2 = \left(\frac{1 \times 3 \times 10^8}{2 \times 495,9 \times 10^6 \times 0.158} \right)^2 = 3.6$$

Del mismo modo se evalúa para f_{res1} y f_{res2} , de donde se obtiene $\epsilon_{r2} = 3.66$ y $\epsilon_{r3} = 3.68$ respectivamente. Por tanto el valor de la permitividad del substrato es $\epsilon_r = 3.6$, y se usará este valor para realizar las simulaciones de los prototipos a ser evaluados.

4.3 Análisis de la antena quasi Yagi

La antena quasi Yagi, está diseñado en un substrato de fibra de vidrio con permitividad $\epsilon_r = 3.6$, con una espesura $h = 1.6 \text{ mm}$, con metalización en ambas caras, que fue elegido por su fácil adquisición, implementación del prototipo y bajo costo.

La implementación del prototipo fue escogido para que funcione en la banda ISM 2.4 a 2.5 GHz, para satisfacer los requerimientos del sistema Bluetooth y de WLANs con los padrones IEEE 802.11 b a 11 Mb/s, llamada Wi-Fi, y IEEE 802.11 g a 54 Mb/s, con un significativo aumento en la taza de datos.

La antena quasi Yagi es mostrada en la figura 2-2, en la cual podemos notar sus elementos principales: la línea de alimentación, el balun, la línea CPS, *driver* (dipolo), director y el reflector.

Sabiendo que la impedancia de entrada es de $Z_0 = 50\Omega$, para el acoplamiento de impedancias, utilizaremos la Ecuación 1.1, del Capítulo 1, de donde se obtiene $W = 2,86\text{mm}$. Otros dos parámetros importantes son λ_0 , que es la longitud de onda en el espacio libre y evaluado en 2.4 GHz ($\lambda_0 = 125\text{mm}$) y λ_g es la longitud de onda en el substrato que puede ser hallada de la Ecuación 4.4:

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{re}}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (4.4)$$

Donde ϵ_{re} esta dado por la ecuación 1.3, resultando un valor de $\lambda_0 = 72.3\text{mm}$

Para poder proyectar el sistema de acoplamiento de impedancia entre la alimentación y el dipolo usado como *driver*, utilizamos un principio físico de que el *driver* planar es parecido al *driver* convencional, teniendo la función de un transformador de impedancia, acoplando la impedancia de la línea de alimentación con la del espacio libre [SCH1995].

Normalmente, la longitud resonante del dipolo es calculado en relación al dipolo convencional, sea $\lambda_g/2$ o λ_g . En nuestro caso fue adoptado el valor de λ_g , debido a la necesidad de acoplar línea CPS en modo impar.

El transformador lambda cuartos, figura 4-3, es una sección de línea de transmisión $\lambda_g/4$ de largo, que se utiliza para acoplar la impedancia de entrada de la línea de

microcinta de 50Ω con la impedancia de las líneas posteriores, la junta T, $R_L = 25\Omega$
Primeramente, la impedancia de entrada (Z_{IN}) es hallado de la Ecuación 4.5:

$$Z_{IN} = Z_1 \frac{R_L + j \cdot Z_1 \cdot \tan \beta l}{Z_1 + j \cdot R_L \cdot \tan \beta l} \quad (4.5)$$

Donde $\beta l = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \cdot \left(\frac{\lambda}{4}\right) = \frac{\pi}{2}$. A continuación, el límite $\beta l \rightarrow \frac{\pi}{2}$ es usado en (4.5) y tanto el numerador como el denominador son divididos por $\tan \beta l$ resultando en:

$$Z_{IN} = \frac{Z_1^2}{R_L} \quad (4.6)$$

De la Ecuación 4.7 se calcula $Z_1 = 35.4 \Omega$, para $\Gamma = 0$ en la sección $\lambda_g/4$, $Z_0 = Z_{IN}$ que resulta

$$Z_1 = \sqrt{Z_0 R_L} \quad (4.7)$$

$$Z_1 = 35.4 \Omega$$

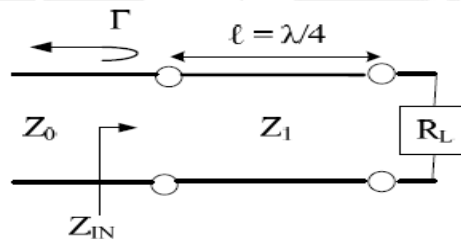


FIGURA 4-3: TRANSFORMADOR DE ADAPTACIÓN DE $\lambda_g/4$ ENTRE LA LÍNEA MICROSTRIP Y LA JUNTA T

FUENTE: "Transformador $\lambda/4$ " [MEL2009]

Por tanto, se tiene una impedancia característica para la línea del transformador $\lambda_g/4$ de $35,4 \Omega$ y con la utilización nuevamente de la Ecuación 1.1 resulta un valor de $4,92$ mm para el ancho de línea del transformador, con una longitud de $16,54$ mm.

Como existe la necesidad de desfasear una de las líneas en 180° , o sea, una de las líneas debe tener una longitud de $\lambda_g/2$ mayor que la otra, para conseguir un acoplamiento de modo impar en la línea microcinta se requiere de una estructura

similar a un balun uniplanar, que sirve de transición de una línea de microcinta a un *strip-line coplanar* CPS.

Por ende, ese acoplamiento de modo impar puede ser transmitido fácilmente al *driver* a través de una línea CPS, adicionalmente se coloca un plano a tierra truncado usado como elemento reflector.

El valor del ancho de la línea del *driver* y del director inicial es de 2,86 mm manteniendo el mismo valor de la línea de alimentación. El *driver* debe poseer una longitud inicial de $\lambda_g/2$ para el acoplamiento con la línea CPS en modo impar, en cuanto el director tiene una longitud es de $\lambda_g/2$. Las distancias entre el *driver* y el plano a tierra truncado y entre el *driver* y el director fueron inicialmente de $\lambda_g/2$ y de $\lambda_g/8$, respectivamente.

El director y el reflector poseen tanto la función de direccionar el padrón de radiación y también de refinar el acoplamiento de impedancia de los elementos de la antena. Las distancias del director al borde superior del sustrato y entre los *drivers* y los bordes laterales son alrededor de $\lambda_g/4$.

Se realiza la implementación inicial, por medio del software EMPro descrito al inicio de este capítulo con la utilización del método matemático FDTD (Finite Difference Time Domain), con ello se inició un proceso iterativo, a través del método de ensayo y error para la optimización del prototipo.

En la figura 4-4 se muestra el prototipo de la antena quasi Yagi para que pueda operar a la frecuencia de 2.4 GHz.

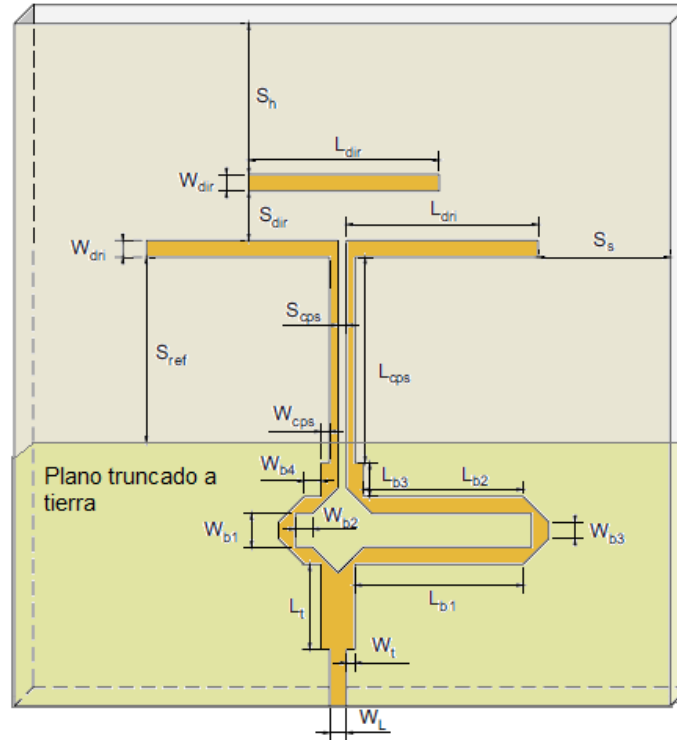


FIGURA 4-4: PROTOTIPO DE LA ANTENA QUASI YAGI

FUENTE: Elaboración propia

Los valores optimizados para los elementos de la antenas y las longitudes de los elementos de la antena y las distancias entre los mismos son mostrados en la figura 4-4, siendo iguales a: $W_L = W_{dri} = W_{dir} = 2,86$, $W_t = 1,27$, $W_{cps} = 1,35$, $W_{b1} = 5,40$, $W_{b2} = W_{b3} = W_{b4} = 2,70$, $L_{dri} = 30,50$, $L_{dir} = 30,30$, $L_{b1} = 26,75$, $L_{b2} = 25,40$, $L_{b3} = 5,35$, $L_{cps} = 32,70$, $L_t = 13,55$, $S_{dir} = 7,80$, $S_{ref} = 29,50$, $S_{cps} = 1,35$, $S_h = 24$ e $S_s = 21$, en las cuales todas las unidades son dadas en mm.

4.3.1 Característica de la antena quasi Yagi

La radiación de la antena quasi Yagi es la combinación de la radiación en el espacio libre y en el sustrato. La radiación en el sustrato consiste en la combinación de polarización TE (transversal eléctrico) y TM (transversal magnético) cuya onda viaja en el medio con ($\epsilon_r = 3.6$).

Para la onda viajante, tanto el campo eléctrico como el campo magnético son perpendiculares uno al otro, y ambos son perpendiculares a la dirección en la que viaja

la onda. Como ya es conocido, una onda que viaja a través de un bloque dieléctrico guiada presenta TE_0 y TM_0 como modos dominantes, mientras que para un bloque dieléctrico a tierra, TM_0 es el modo dominante.

El modo TE_0 es de corte en un bloque dieléctrico a tierra porque el conductor de tierra prohíbe campos eléctricos internos y la continuidad a través del límite dieléctrico/aire, forzando el campo eléctrico, tangencial a la superficie, a cero.

El director parasito, dirige la propagación de la energía hacia la dirección end fire. El conductor y los directores están fuertemente acoplados por la onda de superficie TE_0 . La novedad introducida por esta antena es el uso del plano a tierra truncado como el elemento reflector, este actúa como reflector para la propagación del modo TE_0 debajo de la región dieléctrica debido a que la componente tangencial del campo E es cero en el límite entre el dieléctrico y la superficie del metal.

Tal vez la mayor ventaja a priori de la antena quasi Yagi que tiene que ofrecer es la mejora que proporciona en términos de ancho de banda con relación a las antenas *patch*. Un procedimiento de medición simple para el ancho de banda en la banda de operación o simplemente el ancho de banda de una antena es definir una banda de frecuencias en la cual el VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*) o coeficiente de onda estacionaria es menor que un determinado valor específico, usualmente 2:1. Cuando se utiliza un criterio de radiación, se acostumbra definir la banda de operación de un radiador entre dos puntos de frecuencia en las cuales las potencias radiadas son mitad de la potencia máxima radiada.

En este trabajo vamos a considerar las dos definiciones anteriormente mencionadas como equivalentes para garantizar la funcionalidad de proyecto presentado en esta tesis, el criterio para analizar el ancho de banda se adoptó el valor usual de VSWR 2:1 o $VSWR \leq 2$, pues en ese intervalo se garantiza por lo menos 90% de la potencias de entrada será radiada [POZ1992]. Esa consideración es equivalente a la pérdida de retorno, o sea, el parámetro $S_{11} \leq -10$ dB. Por convención, en esta tesis siempre utilizaremos como parámetro para calcular en ancho de banda, la pérdida de retorno.

De esta forma vamos a definir el ancho de banda de un circuito, siendo normalmente expresada en porcentaje, como:

$$BW(\%) = 100 \frac{f_2 - f_1}{f_0} \quad (4.8)$$

Dónde:

BW = *Bandwidth* o Ancho de banda;

f_2 = Máxima frecuencia de operación en la cual $S_{11} \leq -10$ dB;

f_1 = Mínima frecuencia de operación en la cual $S_{11} \leq -10$ dB;

f_0 = Frecuencia central de operación.

Para el análisis real y la comparación con los resultados de simulación fue construido un prototipo de forma artesanal con las dimensiones presentadas en la figura 4-5, que fue impreso por una impresora láser. El *layout* fue prensado con una plancha a máxima temperatura en la placa el substrato, adhiriéndose a la misma. Después de la primera etapa realizada, la placa de cobre es corroído con oxido férrico, resultando el diseño de la antena. Por último la placa es limpiada y soldada con un conector SMA 50 con diámetro conductor central de 1,25 mm, para la conexión con los equipamientos de medidas.



FIGURA 4-5: ANTENA QUASI YAGI CONSTRUIDA.

FUENTE: Elaboración propia

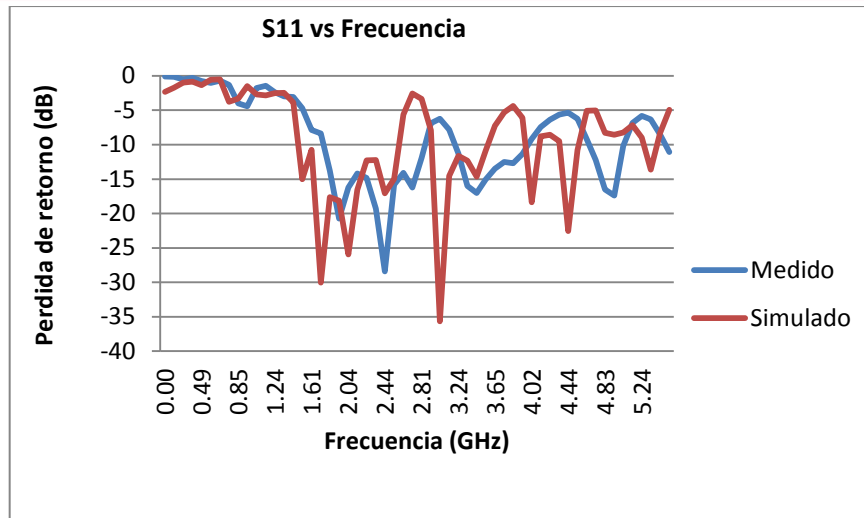
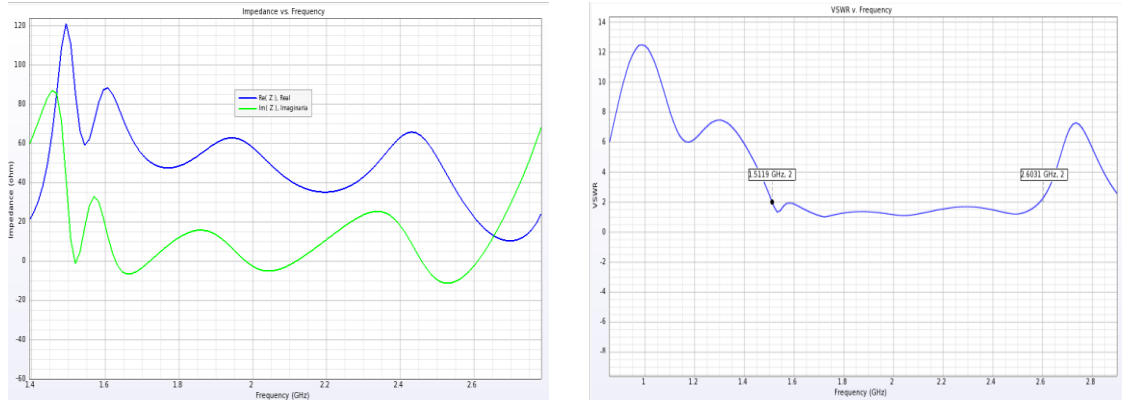


FIGURA 4-6: PÉRDIDA DE RETORNO SIMULADA Y MEDIDA PARA LA ANTENA QUASI YAGI

FUENTE: Elaboración propia

En la figura 4-6 son mostrados los valores vía simulación, realizadas a través del software EMPro, con un ancho de banda de (1.5 – 2.64 GHz ,47.5 %) y el resultado obtenido a través del analizador de red vectorial, VNA, con un ancho de banda de (1.745 – 2.843 GHz, 45,75 %). Esos resultados demuestran que la antena quasi Yagi posee un ancho de banda comparable a una antena corneta, solamente con una fracción de su peso y tamaño.

La figura 4-7, muestran otros dos parámetros facilitando la verificación de la funcionalidad de la antena quasi Yagi en toda su banda de operación. La figura 4-7(a), muestra la impedancia real e imaginaria de la antena simulada vía FDTD, teniendo en claro que mantiene su resistencia en torno a 50Ω y su reactancia en torno a 0, en la banda de operación, asegurando una buena funcionalidad, manteniendo el acoplamiento de impedancia entre ella y su alimentación, durante todo el rango de operación. En la figura 4-7(b), muestra el $VSWR \leq 2$ en la banda de operación, lo que garantiza que por lo menos 90% de la potencia de entrada será radiada.



(a)

(b)

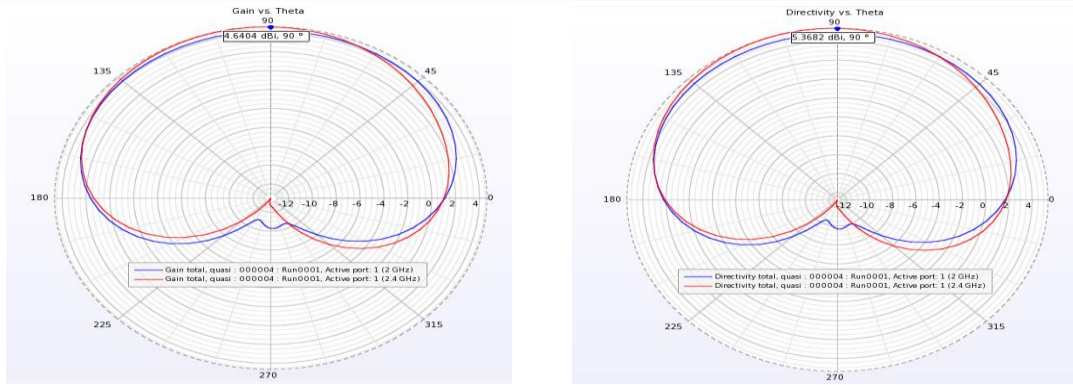
FIGURA 4-7: (a) IMPEDANCIA DE ENTRADA DE LA ANTENA QUASI YAGI (b) VSWR DE LA ANTENA QUASI YAGI

FUENTE: Elaboración propia

4.3.2 Análisis del patrón de radiación de la antena quasi Yagi

Como fue mostrado anteriormente la antena quasi Yagi posee un gran ancho de banda en torno de 47.5%, por tanto se torna necesario verificar si ella puede mantener su patrón de radiación razonablemente constante a lo largo del rango de operación, asegurando así mantener su desempeño.

Otros parámetros simulados fueron la ganancia y la directividad de la antena. Los resultados de estas simulaciones son mostrados en la figura 4-8. En la frecuencia de 2 GHz presentó una ganancia de 4.27 dB y una directividad de 4.79 dB y para la frecuencia de 2.4 GHz presentó una ganancia de 4.64 dB y una directividad de 5.36 dB.



(a)

(b)

FIGURA 4-8: (A) GANANCIA Y (B) DIRECTIVIDAD DE LA ANTENA QUASI YAGI

Fuente: Elaboración propia

En la figura 4-9 se muestra en diagrama del patrón de radiación, en la cual se observa su característica direccional.

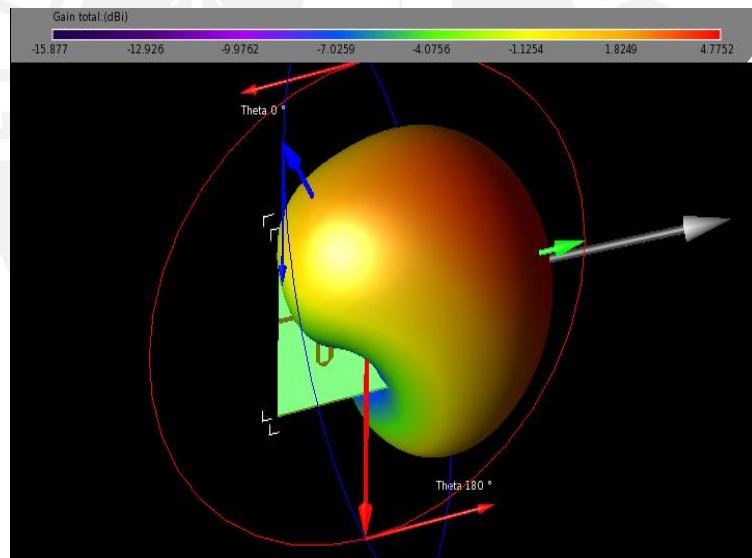


FIGURA 4-9: DIAGRAMA DEL PATRÓN DE RADIACIÓN DE LA ANTENA QUASI YAGI

Fuente: Elaboración propia

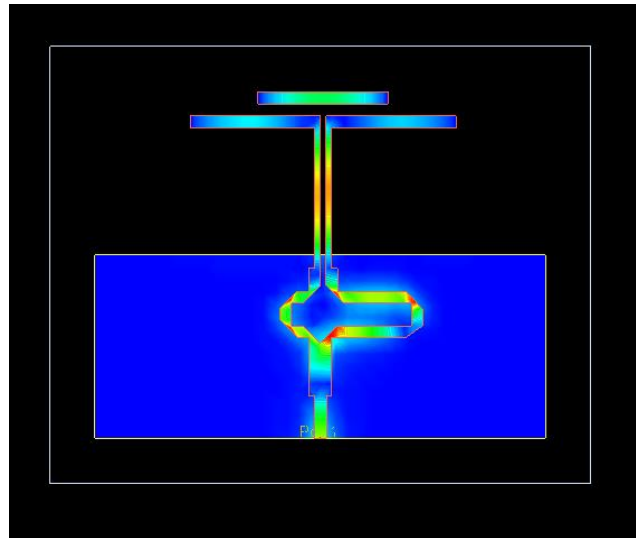


FIGURA 4-10: DISTRIBUCIÓN DE CAMPO EN LA ANTENA QUASI YAGI

Fuente: Elaboración propia

4.4 Estudio de la influencia geométrica del driver y del director

Como se ha visto anteriormente, el ancho de banda de la antena quasi Yagi es una de sus características principales así como su patrón de radiación directivo. Se realizó un estudio para verificar la influencia de la forma geométrica de los drivers y de los directores, principalmente del ancho de banda y del patrón de radiación. Además de observar características usuales como la ganancia y la eficiencia.

Fueron construidos y medidos dos nuevos formatos uno constituido por dos *patches*. Se realizaron además nuevos prototipos en cuanto al número y formato del director de la antena quasi Yagi, proyectándose un arreglo de directores en configuración log-periódica y otro de configuración múltiple.

4.4.1 Driver en formato de patches

En esta estructura se utiliza una nueva configuración para el *driver* de la antena utilizando *patches* en lugar de un dipolo [STU1998]. La denominación de *patches* para los elementos usados en esta nueva geometría de *driver* no es totalmente correcta siendo apenas una referencia debido a su forma rectangular, normalmente apenas referenciado como *patch* [BAL1997]. La diferencia consiste que el *patch* posee un

plano a tierra en su estructura, proporcionando una propagación en el sentido normal a la misma, con los planos E y H ortogonales entre sí en la dirección de propagación, sin embargo el *patch* utilizado en la antena quasi Yagi no tiene un plano a tierra, donde las ondas son radiadas en la dirección del plano del substrato, en función de las características de la antena quasi Yagi.

En la figura 4-11 se muestra el *layout* del *driver* y su respectivo prototipo.

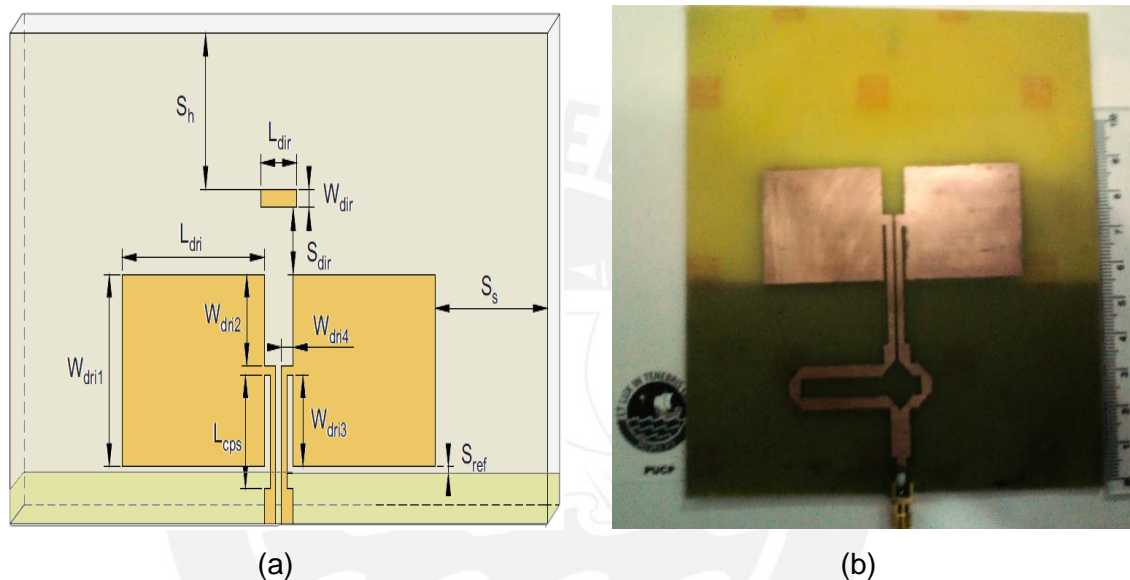


FIGURA 4-11: (a) MEDIDAS DEL DRIVER EN FORMA DE PATCH Y (b) SU RESPECTIVO PROTOTIPO

FUENTE: Elaboración propia

Las medidas mostradas en la figura 4-11(a) son: $W_{dri1} = 29, 57$, $W_{dri2} = W_{dri3} = 14, 07$, $W_{dri4} = W_{dir} = 2, 86$, $L_{dri} = 35$, $L_{dir} = 8, 84$, $L_{cps} = 18, 27$, $S_{dir} = 10, 30$, $S_{ref} = 1$, $S_h = 24$ y $S_s = 27, 70$, en las cuales todas las unidades están dadas en mm.

4.4.4.1 Resultados simulados y medidos

Para la antena con *driver* tipo *patch* optimizada, los valores simulados y medidos son presentados en la figura 4-12. EL gráfico de la pérdida de retorno es mostrado en la figura 4-12, con un ancho de banda simulada de 36.78% y medida de 41,20%. La impedancia de entrada de la antena es presentada en la figura 4-13 muestra que la resistencia esta entorno de 50 y la reactancia en torno de 0 durante la banda de

operación de la antena, asegurando así un buen acoplamiento de impedancia de la estructura.

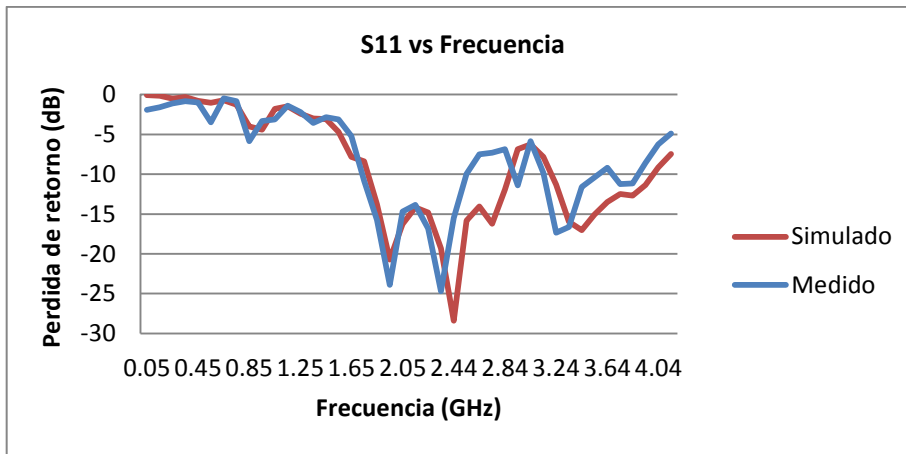


FIGURA 4-12: PÉRDIDA DE RETORNO SIMULADAS Y MEDIDA PARA LA ANTENA QUASI YAGI EN FORMATO PATCH

FUENTE: Elaboración propia

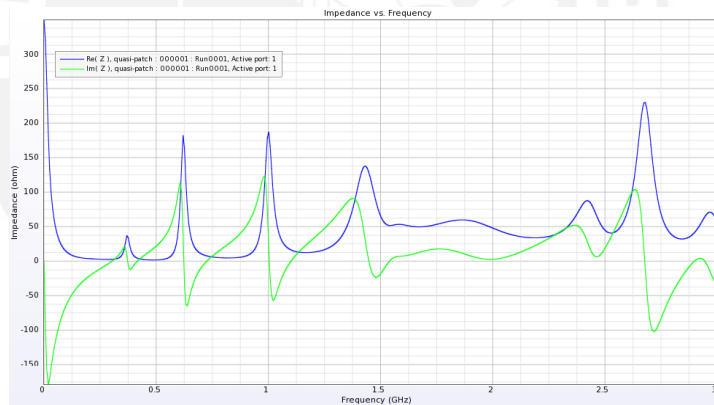


FIGURA 4-13: IMPEDANCIA DE ENTRADA DE LA ANTENA QUASI YAGI EN FORMATO PATCH

FUENTE: Elaboración propia

Otros parámetros simulados fueron la ganancia y la directividad de la antena, los resultados de estas simulaciones son mostrados en la figura 4-14. En la frecuencia de 2 GHz presentó una ganancia de 2.50 dB y una directividad de 4.25 dB y para la frecuencia de 2.4 GHz presentó una ganancia de 4.05 dB y una directividad de 4.89 dB.

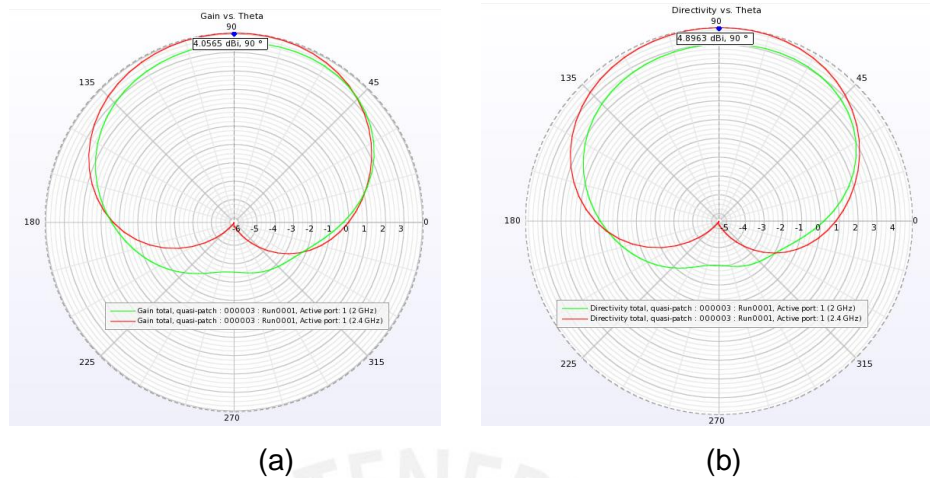


FIGURA 4-14: (a) GANANCIA Y (b) DIRECTIVIDAD DE ANTENA QUASI YAGI EN FORMATO PATCH

FUENTE: Elaboración propia

En la figura 4-15 se muestra en diagrama del patrón de radiación de la antena simulada.

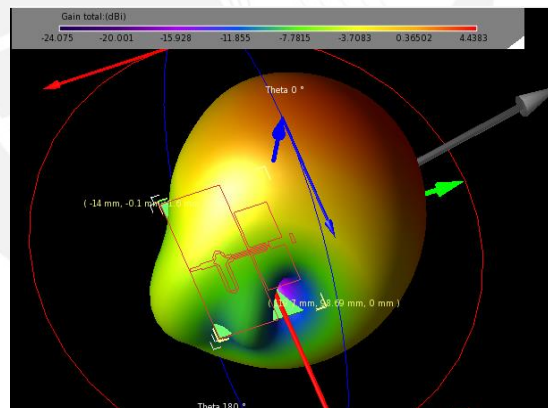


FIGURA 4-15: DIAGRAMA DEL PATRÓN DE RADIACIÓN DE LA ANTENA QUASI YAGI EN FORMATO PATCH

FUENTE: Elaboración propia

4.4.2 Directores en la configuración log-periódica

Otra modificación que se realizó en la estructura de la antena quasi Yagi, con fin de evaluar su comportamiento de la misma fue agregar más de dos directores formando así un composición de reflector, *driver* y tres directores.

Existen trabajos que relatan cómo proyectar y determinar las características del conjunto de dipolos log-periódica radiando en el espacio libre. Sin embargo, pocos estudios tratan de estas antenas utilizando geometrías impresas en microcinta. Para facilitar el proyecto y a fin de realizar comparaciones más precisas entre las características de las diversas estructuras se utilizó la antena quasi Yagi optimizada y se realizó una proyección con más de dos directores con configuración log-periódica.

El *layout* de la configuración log-periódica es mostrado en la figura 4-16, así como el prototipo construido para el testeo de la misma.

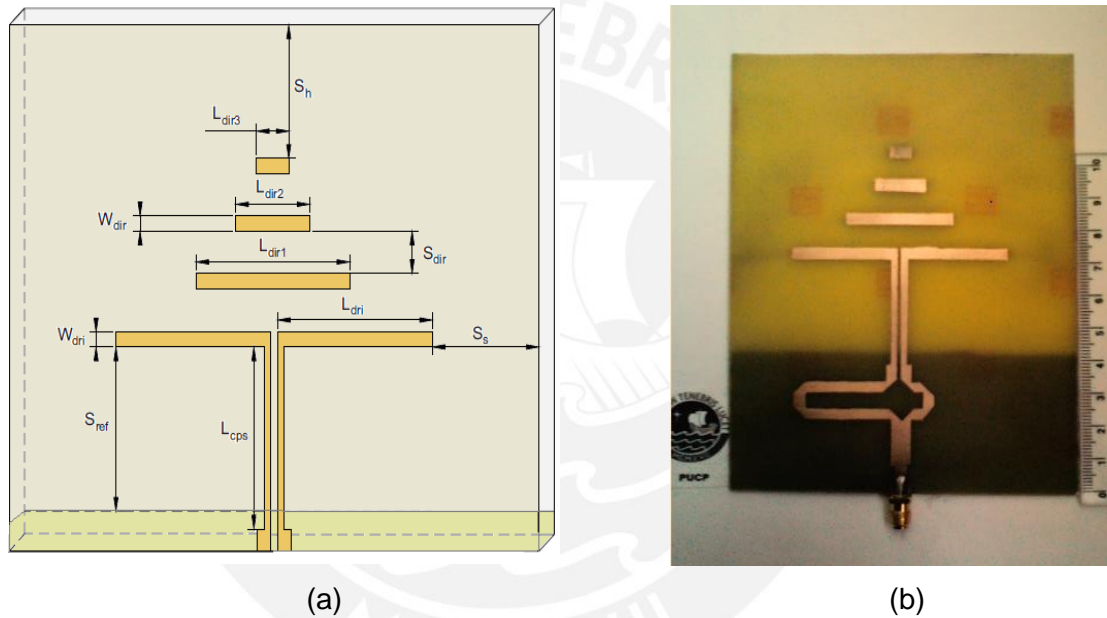


FIGURA 4-16: (a) MEDIDAS DE LA ANTENA QUASI YAGI EN CONFIGURACIÓN LOG-PERIÓDICA Y (b) SU RESPECTIVO PROTOTIPO

FUENTE: Elaboración propia

La configuración log-periódica posee ecuaciones para obtener la proporcionalidad entre elementos [STU1998] mostrada en la Ecuación 4.9.

$$\frac{1}{\tau} = \frac{L_1}{L_2} = \dots = \frac{L_n}{L_{n+1}} = \frac{S_1}{S_2} = \dots = \frac{S_1}{S_{n+1}} = \frac{W_1}{W_2} = \dots = \frac{W_n}{W_{n+1}} \quad (4.9)$$

De la Ecuación 4.9 encontramos los valores iniciales para la optimización de la antena, obteniendo después los valores más apropiados. Utilizando los valores optimizados de la antena quasi Yagi inicial, tenemos que $L_1 = 2 \cdot L_{dir} + 1.43 = 62.43 \text{ mm}$ y $L_2 = L_{dir} = 30$

mm, lo que resulta en $\tau = 0,485$. Con el valor de τ , podemos calcular los valores de L3 e L4, o sea, Ldir2 y Ldir3.

En la práctica para simplificar la construcción, se determina que el ancho de los elementos son iguales, hecho que no compromete el desempeño de la antena. Otra simplificación que se realizó en la estructura es el uso de distancias iguales entre los directores. Teniendo todas las medidas iniciales definidas para la estructura, realizamos un proceso iterativo para la optimización de la misma vía FDTD.

Las medidas optimizadas encontradas son $W_{dri} = W_{dir} = 2,86$, $L_{dri} = 30,50$, $L_{dir1} = 30,30$, $L_{dir2} = 14,56$, $L_{dir3} = 6,40$, $L_{cps} = 32,70$, $S_{dir} = 7,80$, $S_{ref} = 29,50$, $S_h = 24$ e $S_s = 21$, donde todas las unidades están dadas en mm.

Con estos valores, podemos encontrar los parámetros normalmente referidos a antenas en configuración log-periódica [STU1998]:

$$\sigma = \frac{S_n}{L_n} \text{ y } \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{1-\tau}{4\sigma} \right) \quad (4.10)$$

Substituyendo estos valores optimizados de la antena, encontramos el valor de la razón entre la distancia en relación al próximo elemento y el tamaño del elemento $\sigma = 0,125$ y el ángulo formado entre el centro del n -ésimo director y el borde del *driver* $\alpha \approx 45^\circ$.

Como en el caso de los otros prototipos la antena fue optimizada en función de la pérdida de retorno, para que pueda alcanzar el mayor ancho de banda posible. Los resultados de simulaciones vía FDTD y medido para la antena quasi Yagi en configuración log-periódica optimizados son mostrados en la figura 4-17.

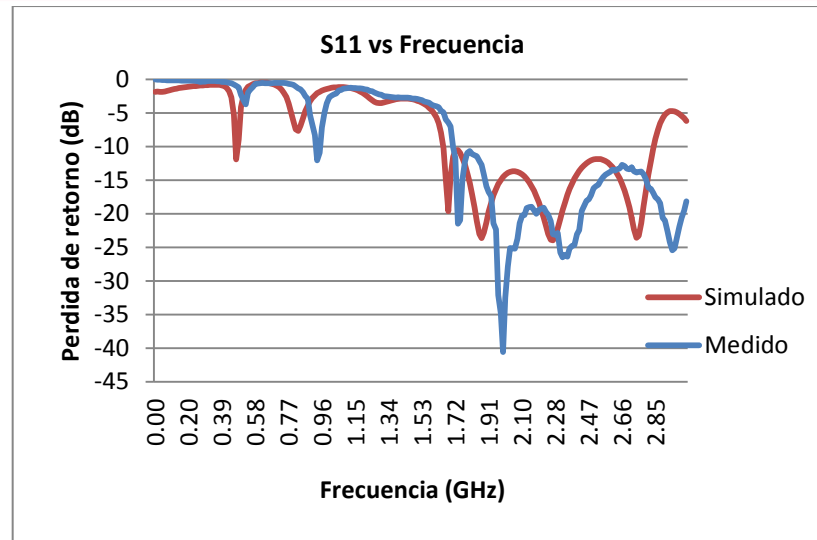


FIGURA 4-17: PÉRDIDA DE RETORNO SIMULADAS Y MEDIDA PARA LA ANTENA QUASI YAGI EN CONFIGURACIÓN LOG-PERIÓDICA

FUENTE: Elaboración propia

El gráfico de la pérdida de retorno es mostrado en la figura 4-17, con un ancho de banda simulada de 49.7% y medida de 50%.

Otros parámetros simulados fueron la ganancia y la directividad, los resultados de estas simulaciones son mostrados en la figura 4-18. En la frecuencia de 2 GHz presento una ganancia de 4.50 dB y una directividad de 5.10 dB y para la frecuencia de 2.4 GHz presenta una ganancia de 5.10 dB y una directividad de 5.63 dB.

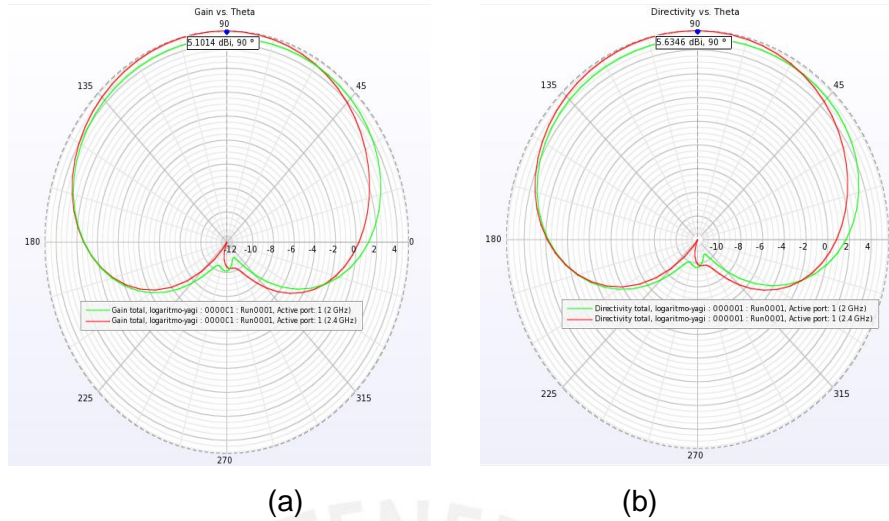


FIGURA 4-18: (a) GANANCIA Y (b) DIRECTIVIDAD DE LA ANTENA QUASI YAGI EN CONFIGURACIÓN LOG-PERIÓDICA

FUENTE: Elaboración propia

La figura 4-19 muestra el patrón de radiación simulado a 2.4 GHz.

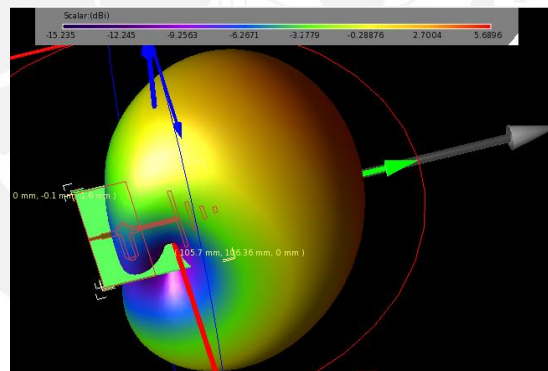


FIGURA 4-19: PATRÓN DE RADIACIÓN DE LA ANTENA QUASI YAGI EN CONFIGURACIÓN LOG-PERIÓDICA

FUENTE: Elaboración propia

4.4.3 Directores en configuración múltiple

La ultima estructura a desarrollarse, es la antena con múltiples directores. Manteniendo las mismas dimensiones de la antena quasi Yagi inicial, se añadirán dos directores más para verificar la diferencia de desempeño.

En la figura 4-20, se puede observar el *layout* de la estructura con tres directores y con su respectivo prototipo.

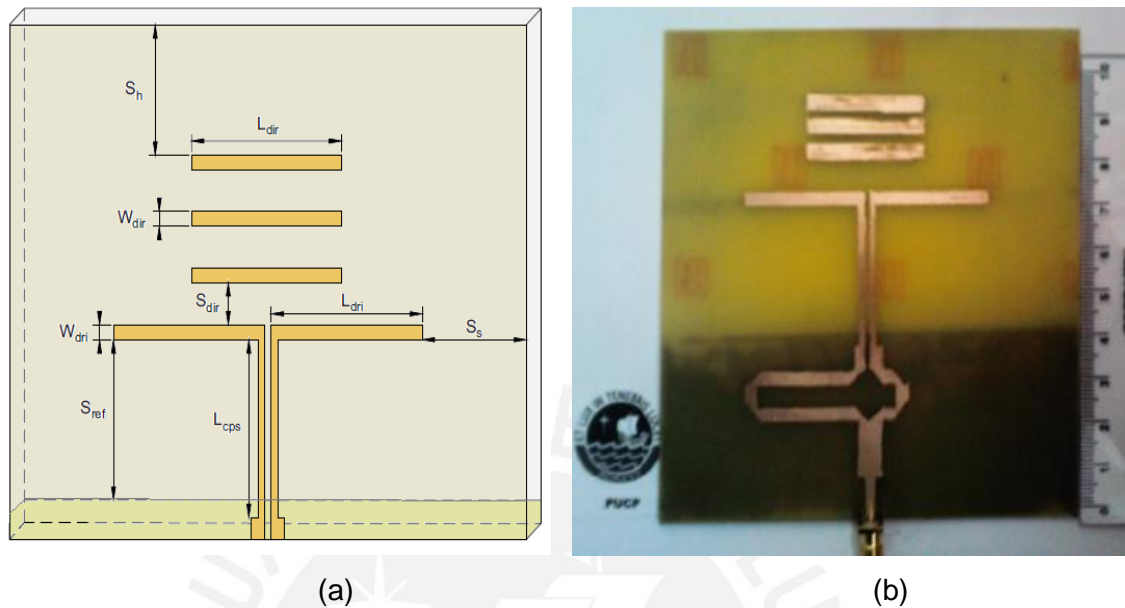


FIGURA 4-20: (a) MEDIDAS DE LA ANTENA QUASI YAGI CON MÚLTIPLOS DIRECTORES Y (b) SU RESPECTIVO PROTOTIPO

FUENTE: Elaboración propia

La configuración múltiple es un prototipo simple, con apenas la inclusión de dos directores más a la configuración de la antena quasi Yagi. Lo tamaños de los directores y la separación entre ellos, son mantenidos iguales, con los mismos valores para la antena quasi Yagi. No fue utilizado ningún proceso de optimización, apenas el incremento de dos elementos parásitos fueron añadidos en su estructura, para poder comparar de forma más precisa con la antena quasi Yagi.

Las medidas mostradas en la figura 4-20(a) son: $W_{dri} = W_{dir} = 2,86$, $L_{dri} = 30,50$, $L_{dir} = 30,30$, $L_{cps} = 32,70$, $S_{dir} = 7,80$, $S_{ref} = 29,50$, $S_h = 24$ e $S_s = 21$, en las cuales todas las unidades son dadas en mm.

La pérdida de retorno es mostrada en la figura 4-21, y presenta un ancho de banda simulada de 37.5 % y medida de 32.9%.

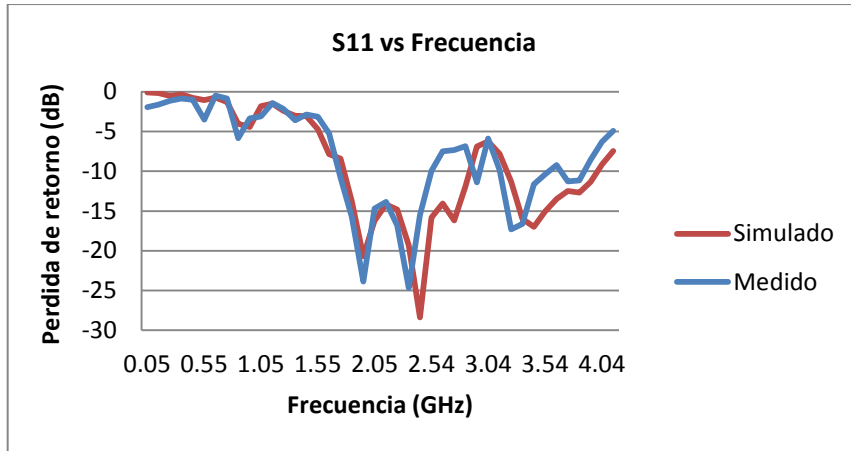


FIGURA 4-21: PÉRDIDA DE RETORNO SIMULADA Y MEDIDA PARA LA ANTENA QUASI YAGI EN CONFIGURACIÓN MÚLTIPLE

FUENTE: Elaboración propia

Finalizando el análisis de la antena, se presentan en la figura 4-22 simulados vía FDTD. Se puede observar que la directividad aumenta comparado a la antena quasi Yagi con un solo director. En la frecuencia 2GHz presento una ganancia de 4.7 dB y una directividad de 5.21dB y para la frecuencia de 2.4 GHz presenta una ganancia de 5.10 dB y una directividad de 6.38 dB.

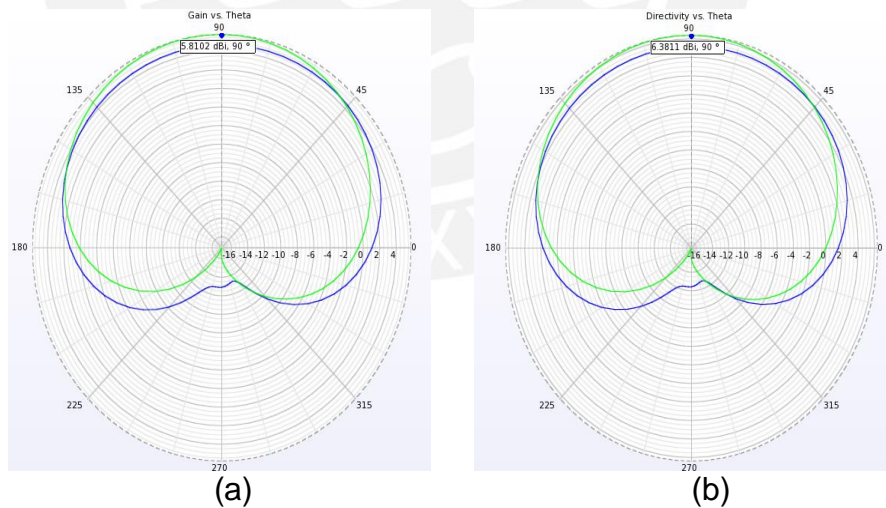


FIGURA 4-22: (A) MUESTRA LA GANANCIA Y (B) MUESTRA LA DIRECTIVIDAD DE LA ANTENA QUASI YAGI

FUENTE: Elaboración propia

La figura 4-23 muestra el patrón de radiación simulado a 2.4 GHz.

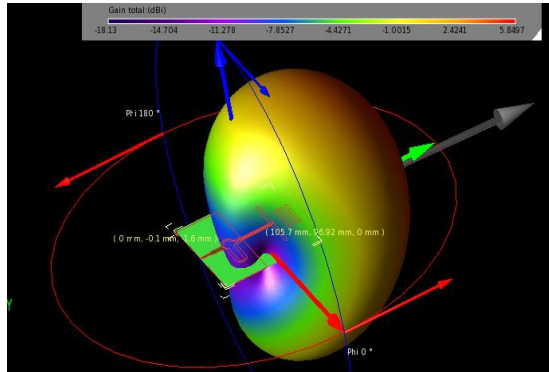


FIGURA 4-23: PATRÓN DE RADIACIÓN DE LA ANTENA QUASI YAGI EN CONFIGURACIÓN MÚLTIPLE

FUENTE: Elaboración propia

4.4.4 Comparación de resultados de los prototipos presentados

Se realizó el análisis de la influencia geométrica del *driver* asumiendo la forma de *patch* y de la cantidad y disposición geométrica del número de directores en la estructura. Las estructuras fueron optimizadas en relación al ancho de banda, simulado vía FDTD.

Se presentado en la Tabla 4.1 las estructuras proyectadas.

Antena simulada	Frecuencia inferior (GHz)	Frecuencia superior (GHz)	Ancho de banda (GHz)
Quasi Yagi	1.5	2.64	1.14
Quasi Yagi - Patch	1.7	2.5	1.10
Quasi Yagi – Log periódica	1.7	2.84	1.14
Quasi Yagi - Múltiple	1.75	2.95	1.2

TABLA 4.-1 RESUMEN DE LA BANDA DE OPERACIÓN SIMULADA VÍA FDTD PARA LAS ANTENAS SIMULADAS

FUENTE: Elaboración propia

De la Tabla 4.1 notamos que las antenas simuladas tienen aproximadamente el mismo ancho de banda. Observando las características del patrón de radiación de las antenas, observamos que la antena con configuración múltiple posee una mayor directividad en función del aumento del número de directores.

Se concluye que cada estructura posee una particularidad pudiendo ser optimizada futuramente aún más y que la antena quasi Yagi posee un comportamiento balanceado manteniendo una buena relación entre todas las características para una antena.

4.5 Arreglo lineal de elementos quasi Yagi

Los sistemas de comunicación de las próximas generaciones exigirán antenas de banda ancha, ofreciendo la posibilidad de operación multibanda. Para cumplir estos requisitos necesarios la antena quasi Yagi es una seria candidata a este tipo de aplicaciones.

Estos atributos atractivos que posee la antena quasi Yagi sugieren fuertemente su aplicación en arreglos de antenas. Una antena sola quasi Yagi operando en el espacio libre presenta un considerable ancho de banda, alta eficiencia y moderada ganancia

El primer proyecto a ser mostrado, que va a suplir las necesidad de un elemento radiador para aplicaciones de sistemas adaptativos, es de un arreglo lineal de cuatro elementos quasi Yagis.

El primer prototipo es un arreglo de cuatro elementos quasi Yagis idénticos. La figura 4-24 muestra el *layout* del arreglo lineal de cuatro elemento quasi Yagis y su prototipo respectivo. Para que se tenga un patrón de radiación *end fire*, la separación entre elementos es $\leq \lambda_g/2$. La distancia optimizada de separación entre elementos fue de 24 mm.

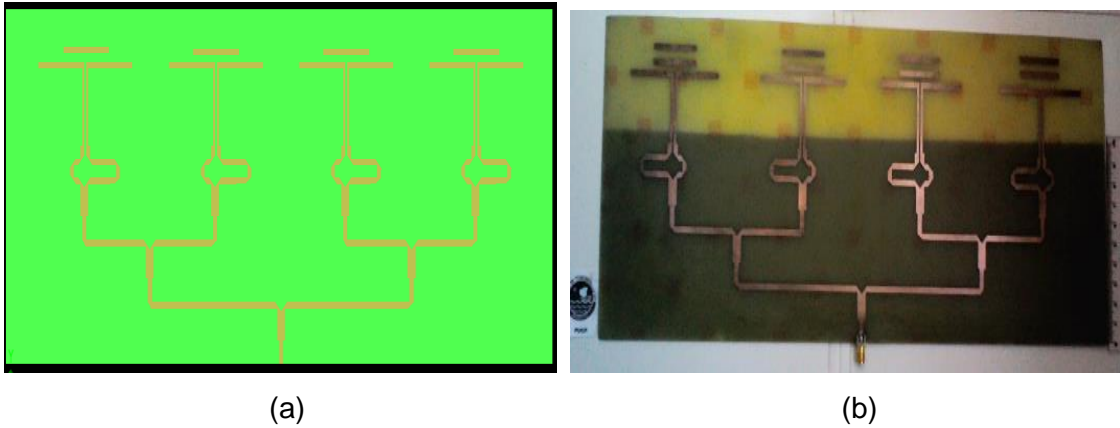


FIGURA 4-24: (a) PROTOTIPO DEL ARREGLO LINEAL DE CUATRO ELEMENTOS E (b) IMPLEMENTACIÓN DEL ARREGLO LINEAL DE CUATRO ELEMENTOS

FUENTE: Elaboración propia

La pérdida de retorno es mostrada en la figura 4-25, y presenta un ancho de banda simulada de 41.6 % y medida de 37.5%. Se observa que el ancho de banda se mantiene casi constante al de un solo elemento radiador.

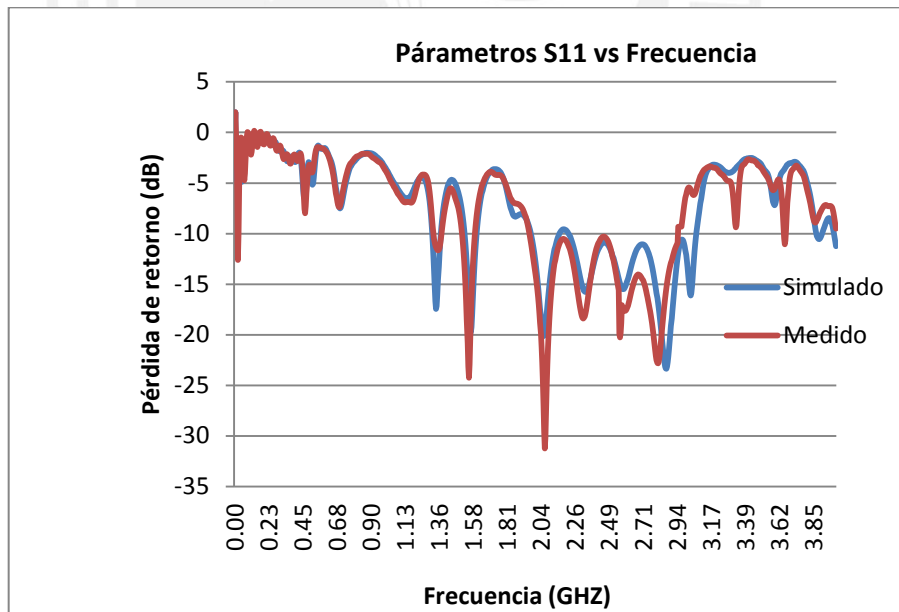


FIGURA 4-25: PÉRDIDA DE RETORNO SIMULADA Y MEDIDA PARA UN ARREGLO DE CUATRO ELEMENTOS QUASI YAGIS

FUENTE: Elaboración propia

Finalizando el análisis de la antena, se presentan en la figura 4-26 simulados vía FDTD la directividad y ganancia del arreglo. Se puede observar que tanto la ganancia como la directividad aumentan significativamente aproximadamente al doble comparado a la antena quasi Yagi. En la frecuencia 2GHz presento una ganancia de 8.5 dB y una directividad de 9.8 dB y para la frecuencia de 2.4 GHz presenta una ganancia de 9.8 dB y una directividad de 10.36 dB.

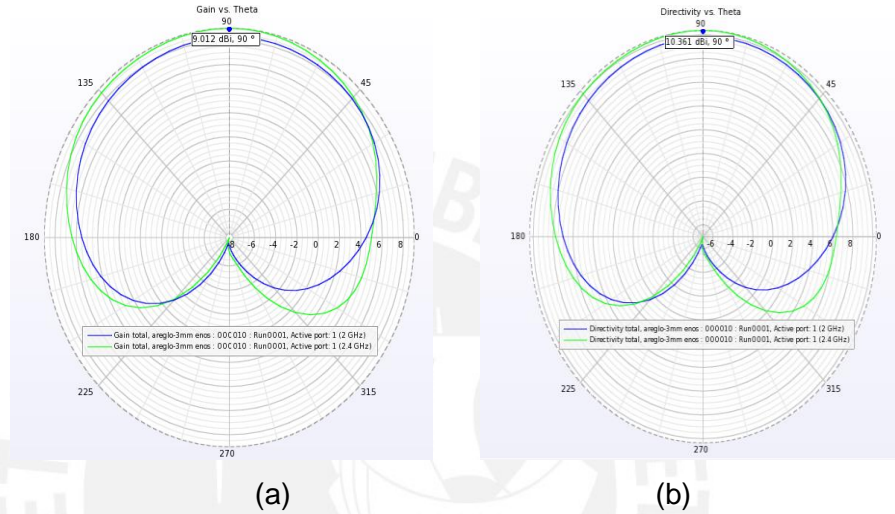


FIGURA 4-26: (a) GANANCIA Y (b) DIRECTIVIDAD DEL ARREGLO DE ELEMENTOS QUASI YAGIS

FUENTE: Elaboración propia

En la figura 4-27 se muestra el patrón de radiación y se observa que el lóbulo de máxima radiación es angosto, por ende más directiva comparado al de un solo elemento.

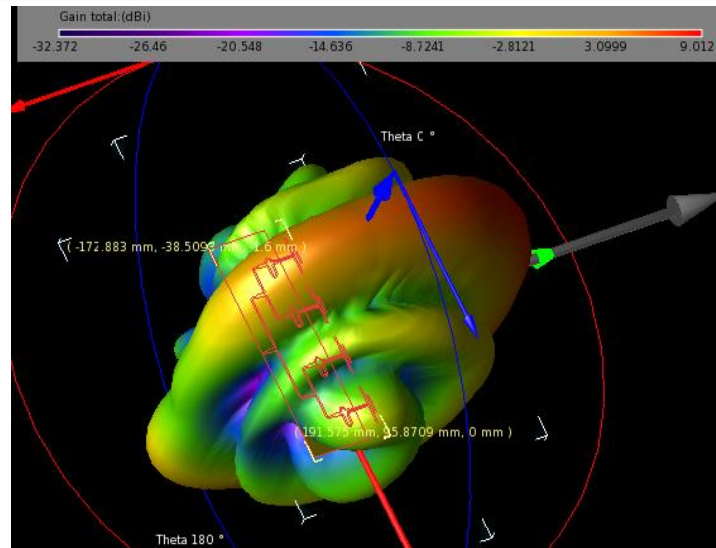


FIGURA 4-27: PATRÓN DE RADIACIÓN DE UN ARREGLO LINEAL DE CUATRO ELEMENTOS QUASI YAGIS

FUENTE: Elaboración propia

4.6 Arreglo de elementos quasi Yagis para Beamforming

Una de las ventajas de usar arreglos de antenas es la posibilidad de reconfigurar el patrón de radiación en función de la alimentación y las fases aplicadas. De esta manera se alimenta diferentes elementos del arreglo.

Como se explicó en el capítulo anterior, la generación de lóbulos de un patrón de radiación se conoce como *beamforming* y este se puede hacer automáticamente mediante técnicas de procesamiento digital de señales.

Para poder adaptar el arreglo de elementos quasi Yagis para aplicaciones *beamforming* es necesario afinar aún más el patrón de radiación, de tal forma que sea lo más directivo en el plano de elevación como el azimut. Para ello a la configuración inicial del arreglo se aumentó dos elementos reflectores con un ángulo de 120° de separación entre los elementos reflectores.

La figura 4-28 muestra el prototipo del arreglo de antenas para aplicaciones de *beamforming*.

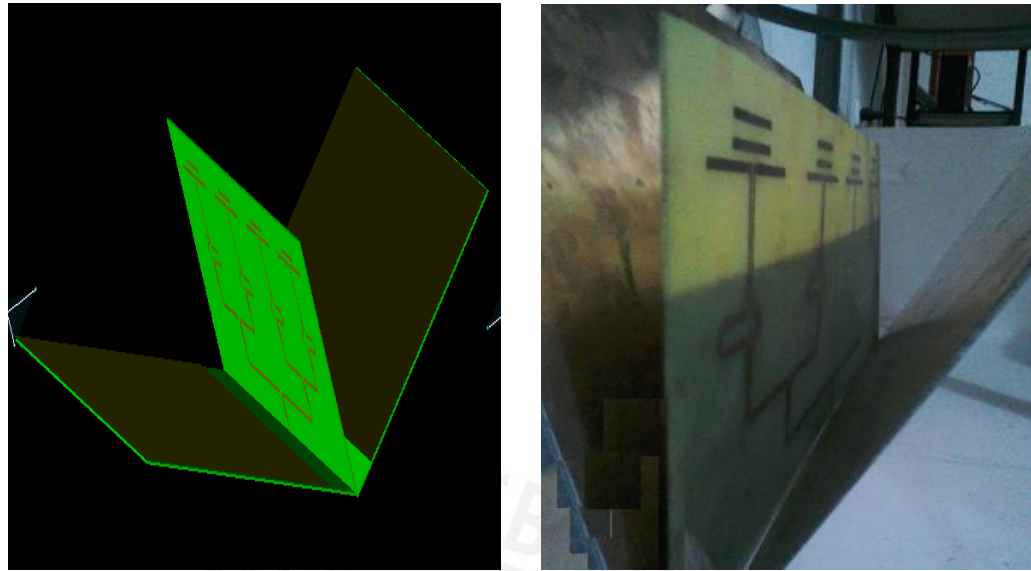


FIGURA 4-28: ARREGLO DE ELEMENTOS QUASI YAGIS PARA APLICACIONES DE BEAMFORMING

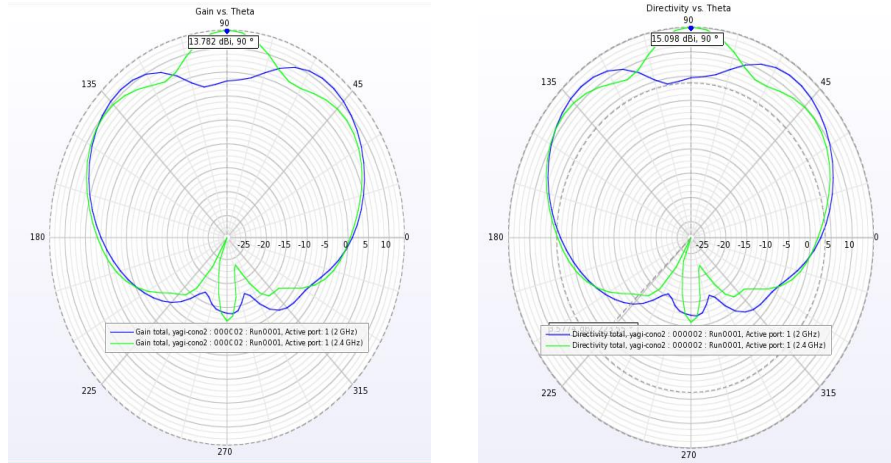
FUENTE: Elaboración propia

La figura 4-29 muestra la pérdida de retorno para el prototipo presentado, se verifica que el ancho de banda se mantiene en aproximadamente 1 GHz. En la figura 4-30 se muestra la directividad y la ganancia de la antena, tanto el plano azimut como el plano de elevación, se puede observar que la directividad aumenta alrededor de 25 %, esa característica permite utilizar este tipo de arreglo para aplicaciones de beamforming.



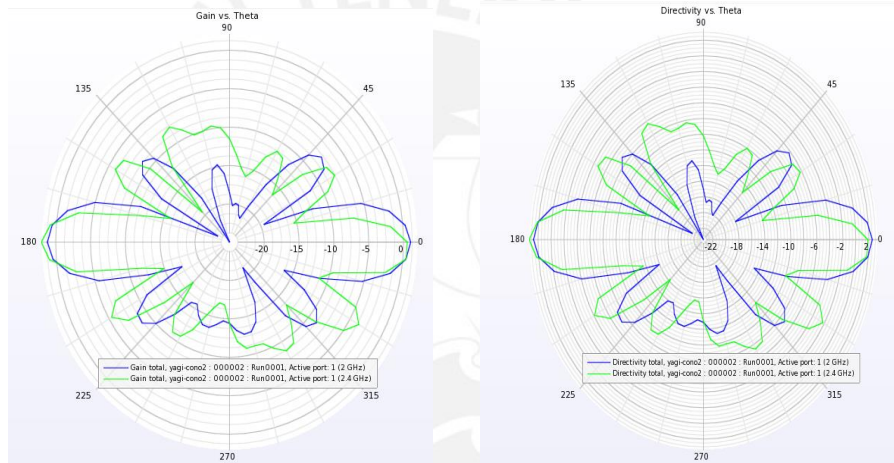
FIGURA 4-29: PÉRDIDA DE RETORNO DEL ARREGLO DE CUATRO ELEMENTOS QUASI YAGIS PARA APLICACIONES BEAMFORMING

FUENTE: Elaboración propia



(a)

(b)



(c)

(d)

FIGURA 4-30: (a) GANANCIA EN EL PLANO DE ELEVACIÓN, (b) DIRECTIVIDAD EN EL PLANO DE ELEVACIÓN, (c) GANANCIA EN EL PLANO AZIMUT Y (d) DIRECTIVIDAD EN EL PLANO AZIMUT DEL ARREGLO DE CUATRO ELEMENTOS QUASI YAGIS PARA APLICACIONES DE BEAMFORMING.

FUENTE: Elaboración propia

En la figura 4-31 se muestra el diagrama del patrón de radiación, en ella se observa la directividad del patrón de radiación tanto en el plano de elevación como en plano de la azimut.

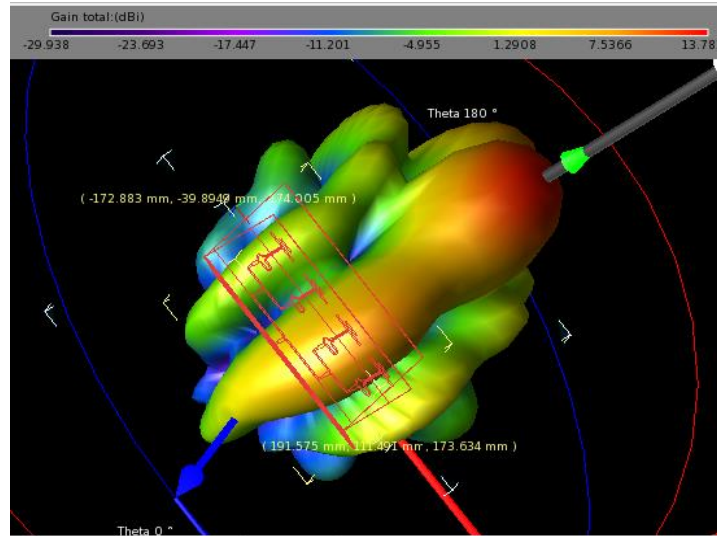


FIGURA 4-31: PATRÓN DE RADIACIÓN DE UN ARREGLO DE ELEMENTOS QUASI YAGI PARA APLICACIONES BEAMFORMING

FUENTE: Elaboración propia

4.6.1 Formación del haz de radiación para aplicaciones beamforming

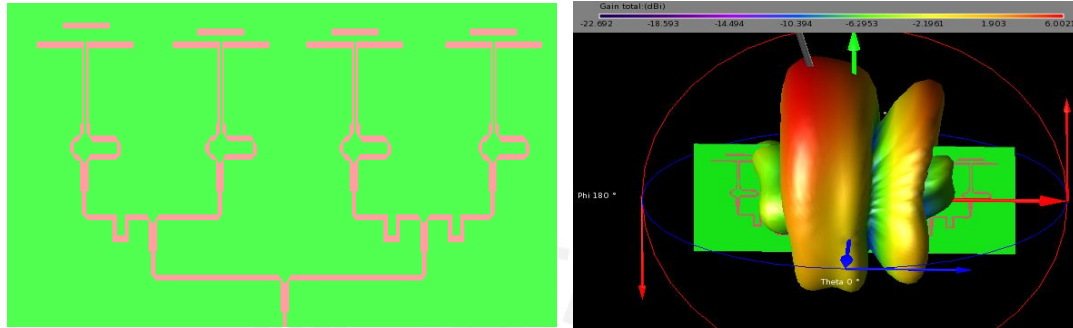
En el ítem anterior se desarrolló el prototipo de la antena para aplicaciones de *beamforming* y en ella se aprecia un mayor refinamiento del patrón de radiación para que guarde su característica direccional en el plano de elevación y en la azimut. Presentamos ahora la variación de patrón de radiación en función al desfase en la alimentación. Para ello utilizamos el prototipo del arreglo lineal de cuatro elementos, al cual se ha realizado un desfase en las líneas de alimentación para cada elemento quasi Yagi.

Cabe destacar que estos desfases son realizados por circuitos electrónicos analógicos o digitales. Para la verificación de la formación de haces que utiliza la tecnología *beamforming*, se creará prototipos para variar el desfase en la alimentación de los elementos individuales del arreglo.

Para el desfase en la alimentación se extendió la línea de alimentación *microstrip* que va a cada elemento individual. Por ejemplo, para un desfase de 90° se incremento un tramo de línea de $\lambda_g/2$, para un desfase de 180° una longitud de λ_g y para un desfase de 270° una longitud de $3\lambda_g/2$.

La figura 4-32 muestra el arreglo lineal de antenas con un desfase en la alimentación para cada uno de los elementos.

Tener en cuenta que se pueden generar 4^4 combinaciones posibles para realizar el desfase en la alimentación.



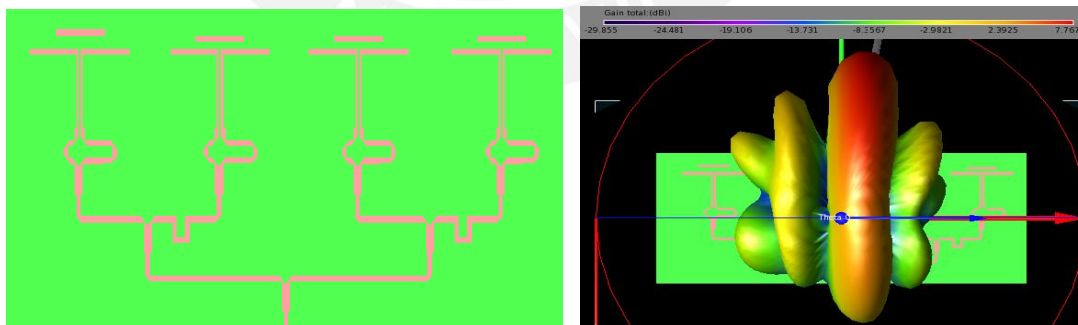
(a)

(b)



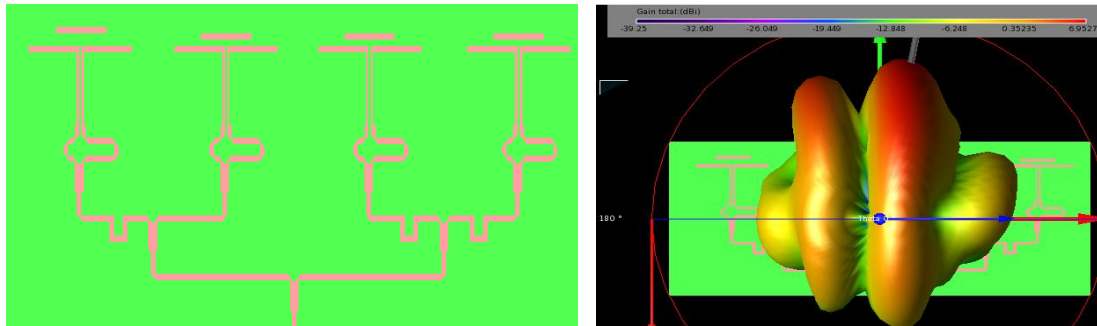
(c)

(d)



(e)

(f)



(g)

(h)

FIGURA 4-32: PROTOTIPOS DEL ARREGLO LINEAL CON DESFASES EN LA ALIMENTACIÓN CON LA MEDICIÓN DE SU PATRÓN DE RADIACIÓN PARA CADA PROTOTIPO

FUENTE: Elaboración propia

De los prototipos simulados se puede concluir que conforme se varía la fase de alimentación para cada elemento quasi Yagi varía el patrón de radiación, el lóbulo principal cambia de dirección lo que es aplicable a la tecnología *beamforming*.

Conclusiones y Recomendaciones

- **Conclusiones**

Luego del desarrollo de la presente tesis se concluye:

- La antena quasi Yagi superan muchas limitaciones existentes en la topología de antenas tipo *patch*, como el ancho de banda angosto de éstas. En este sentido las antenas quasi Yagi desarrolladas en esta tesis presentan un mayor ancho de banda, alrededor de 1 GHz. Esto es comparable a la performance de una antena bocina, pero con apenas una fracción de tamaño, peso y costo.
- A partir del estudio de la variación de la geometría del elemento radiador y del director de la estructura, fueron propuestos tres nuevos prototipos, uno constituido por dos *patches* como elemento radiador en vez de un dipolo, un segundo prototipo emplea múltiples directores y un tercero, directores en configuración log-periódica. Todas las estructuras analizadas se mostraron viables para la banda Wi-Fi pudiendo alcanzar otras bandas de frecuencias como la banda PCS americano.

- Los patrones de radiación para la antena son razonablemente constantes a lo largo de la banda de operación y con buena relación *front to back*, alrededor de 14 dB, lo que hace que sea atractivo para el uso de arreglos.
- El arreglo de elementos quasi Yagi presenta buenas características de acoplamiento mutuo entre los elementos del arreglo, lo cual resulta en un incremento de la directividad y ganancia de la antena. Esto puede ser aplicado a la tecnología *beamforming*.
- Un arreglo con elementos quasi Yagis, conjuntamente con un desplazador de fase digital o analógico, convierte a la antena quasi Yagi en una antena inteligente ya que permite direccionar el lóbulo principal, y adaptarlo en tiempo real. Es decir, se pueden formar haces directivos, y focalizar el lóbulo principal hacia la dirección de proveniencia de las señales, proporcionando así un mayor alcance y mejor uso del espectro a la hora de transmitir una señal.
- Todas las aplicaciones, presentadas en la tesis, están basadas en elementos quasi Yagi de bajo costo, fabricación simple, en forma planar y de fácil integración con dispositivos de microondas.

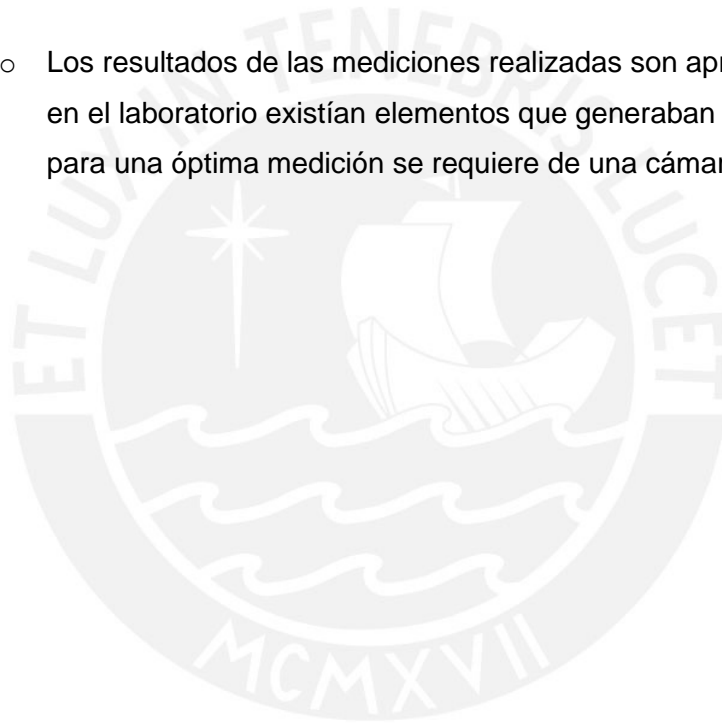
- **Recomendaciones**

Se sugieren, a continuación, algunas recomendaciones a tener en cuenta sobre el presente proyecto:

- En el mercado nacional, los proveedores de los substratos para la fabricación de los circuitos impresos, desconocen el valor de la permitividad o constante dieléctrica que tienen los substratos. Por ello, se sugiere medir primero la permitividad del substrato para que en base a ello se realice con mayor exactitud el diseño.
- Cuando se utiliza el programa de simulación EMPRO se tiene varias marcas de substratos con constantes dieléctricas aproximadas al

substrato utilizado y para obtener el resultado deseado a la frecuencia de diseño es necesario realizar la configuración exacta con el valor de la permitividad medida y con la frecuencia en evaluación. Esto se hace porque en el mercado nacional no tenemos las marcas de substratos que aparecen en el programa.

- Al momento de soldar el conector SMA 50, para la alimentación de la antena microcinta, deben evitarse los restos de estaño y las protuberancias; es decir, la soldadura debe ser fina para no afectar la radiación de los demás elementos de la antena.
- Los resultados de las mediciones realizadas son aproximados porque, en el laboratorio existían elementos que generaban ondas reflejadas; para una óptima medición se requiere de una cámara anecóica.



Bibliografía

- [ALB2007] Albornoz, R. (2004). Antenas Inteligentes. Universidad de Carabobo Valencia.
- [BAL1997] Balanis, C. (1997). *Antenna Theory: Analysis and Design* (second ed.). Jhon Wiley Sons.
- [BAR2007] Barra, T. (2007). *Um ambiente evolutivo para apoio ao projeto de antenas de microfita*. Universidade Estadual de Campinas .
- [DES1953] Deschamps, G. (1953). *Microstrip microwave antenas*. In The Third Symposium on the USAF Antenna Research and Development Program.
- [DEA2000] Deal W, Kaneda N, Sor J(2000). *A new Quasi Yagi antenna for planar active antenna arrays*. IEEE Trans Microwav Theory Tech, vol 48, no 6.
- [COL1985] Collin,R.(2000). *Antennas and Radiowave Propagation*. Hill International Editions. EUA.
- [FAR2007] Farhan, R. (2007). *Antenna Arrays and Phase Arrays*. Cornell University. pp 1-8
- [GAR2001] Garg, R. (2001). *Microstrip antenna desing handbook*. pp. 2-4.
- [GIR2003] Girish, K. (2003). *Broadband Microstrip Antennas*. Artech House.
- [HOW1972] Howell, J. (1972). *Microstrip antennas*. Int Symp Digest, pp.177-180.

- [HUA1989] Huang, J. (1989). *Planar Microstrip Array Antenna*. IEEE APS/USRI Symposium Digest, pp.894-897.
- [IEE1993] IEEE. (1993). IEEE Standard definitions of terms for antennas. *IEEE*.
- [KAN2000] Kaneda, J. (2000). *A new quasi Yagi antenna for planar active antennas arrays*. IEEE Trans. Microwave Theory Tech.
- [LIB1999] Liberti, J. (1999). *Comparison of beamforming techniques for W-CDMA communication systems*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 52, no. 4, pp. 752-760.
- [LIU2003] Liu, T. (2003). *Smart Antennas for Wireless Communications*. Prentice Hall.
- [MAR2001] Marek E. Białkowski, H. J. (2001). *A broadband uniplanar quasi Yagi - parameter study in application to a spatial power combiner*. Journal of Telecommunications and Information Tecnology, pp. 42-43.
- [MOH2002] Mohammad, E. (2002). *The smart antenna application in mobile communication*. Helsinki University of Technology, Control Engineering Lab.
- [MEL2009] Melais, S. E. (2009). *A quasi Yagi antenna with end fire radiation over a metal ground*. University of South Florida.
- [MUN1972] Munson, R. (1972). *Conformal microstrip antennas and microstrip phased arrays*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, pp. 74-78.

- [POZ1992] Pozar, D. (1992). *Microstrip antennas*. In IEEE Proceedings.
- [POZ2005] Pozar, D. (2005). *Microwave Engineering*. New York:Wiley.
- [SCH1995] Schaubert, P. (1995). *Microstrip antennas*. New York: IEEE Press.
- [STU1998] Stutzman, W. (1998). *Antenna Theory and Design*. Jhon Wiley & Sons.



ANEXOS

ANEXO 1: SIMULACIONES EN EMPRO AGILENT

