



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA**  
**ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS**  
**RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y**  
**TELECOMUNICACIONES**

**“DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE  
ARREGLO DE ANTENAS MIMO PARA PRUEBAS  
EN REDES WLAN.”**

Tesis previa a la obtención del Título de  
Ingeniero en Electrónica y  
Telecomunicaciones.

**AUTOR:**

*Cristhian Javier Ordóñez Cárdenas*

**DIRECTOR:**

*Ing. Mario Alberto Espinoza Tituana, Mg Sc.*

**LOJA – ECUADOR**  
2016

# CERTIFICACIÓN

## CERTIFICACIÓN

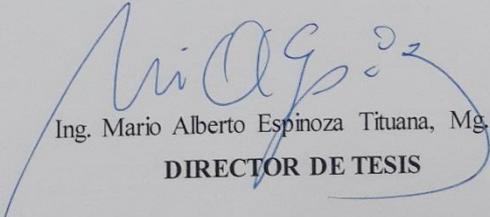
Ing. Mario Alberto Espinoza Tituana, Mg. Sc.

**DOCENTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES DEL ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA**

### CERTIFICA:

Haber dirigido, asesorado, revisado y corregido el presente trabajo de tesis de grado, en su proceso de investigación, cuyo tema versa **“DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE ARREGLO DE ANTENAS MIMO PARA PRUEBAS EN REDES WLAN.”**, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, realizado por el señor egresado: Cristhian Javier Ordoñez Cárdenas, el mismo que cumple con la reglamentación y políticas de investigación, por lo que autorizo su presentación y posterior sustentación y defensa.

Loja, 16 de Febrero del 2016.



Ing. Mario Alberto Espinoza Tituana, Mg. Sc.

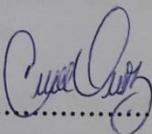
**DIRECTOR DE TESIS**

## AUTORÍA

### AUTORÍA

Yo, **CRISTHIAN JAVIER ORDÓÑEZ CÁRDENAS**, declaro ser el autor del presente trabajo de tesis y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos o acciones legales por el contenido de la misma.

Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional-Biblioteca Virtual.

Firma:.....

Cédula: 0705363869

Fecha: 14 de Julio del 2016

## CARTA DE AUTORIZACIÓN

**CARTA DE AUTORIZACIÓN  
CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DEL AUTOR,  
PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y  
PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO.**


Yo **CRISTHIAN JAVIER ORDÓÑEZ CÁRDENAS**, declaro ser el autor de la tesis titulada **DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE ARREGLO DE ANTENAS MIMO PARA PRUEBAS EN REDES WLAN**, como requisito para optar al grado de ingeniero en **ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**; autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el repositorio digital institucional:

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, 14 días de mes de julio del dos mil dieciséis.

**Firma:**



**Autor:** Cristhian Javier Ordóñez Cárdenas.

**Cédula:** 0705363869.

**Dirección:** Loja (Barrio Esteban Godoy)

**Correo electrónico:** crjaorcar@hotmail.com

**Teléfono:** 2980003

**Celular:** 0986560416

**Datos complementarios:**

**Director de tesis:** Ing. Mario Alberto Espinoza Tituana, M. Sc.

**Tribunal de grado:** Ing. Andy Fabricio Vega León, M. Sc.

Ing. Paulo Alberto Samaniego Rojas, M. Sc.

Ing. Benjamín Andrés Pusay Villarroe], M. Sc.

## **DEDICATORIA**

Dedico el fruto de este trabajo en primer lugar a Dios y a mi familia, especialmente a mi madre y mi padre, quienes en base a esfuerzos y sacrificios han logrado que llegue a estas instancias y me han brindado un apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida estudiantil. A mi hermana por acompañarme y ser parte de esta importante etapa de mi vida.

*Cristhian Javier Ordóñez Cárdenas*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por haberme guiado y llenado de fuerza y valor para poder alcanzar esta meta trazada.

A mis Padres y hermana, por confiar en mí y ser el apoyo principal de mi vida, por darme la fortaleza para seguir adelante, por siempre inculcarme valores y brindarme su infinito amor, comprensión y apoyo incondicional.

A todos los docentes de la carrera de Electrónica y Telecomunicaciones, quienes con paciencia y sabiduría supieron compartir su conocimiento y enseñanzas. A mi director de tesis por su preocupación y guía en la realización de mi proyecto de tesis y por sus importantes consejos.

A mis compañeros y amigos, ya que fueron parte significativa a lo largo de mi vida universitaria, con quienes compartí días de estudio, gratas experiencias y un apoyo recíproco en todo momento.

*Cristhian Javier Ordóñez Cárdenas*

## TABLA DE CONTENIDO

CARATULA .....	i
CERTIFICACIÓN .....	ii
AUTORÍA .....	iii
CARTA DE AUTORIZACIÓN .....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
TABLA DE CONTENIDO .....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
ÍNDICE DE TABLAS .....	xiii
NOMENCLATURA.....	xiv
1. TÍTULO.....	1
2. RESUMEN .....	2
2.1 SUMMARY .....	3
3. INTRODUCCIÓN .....	4
4. REVISIÓN DE LITERATURA .....	5
4.1 HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LAS REDES WLAN .....	5
4.1.1 La creación del estándar Wi-Fi .....	6
4.1.2 Conceptos básicos del Wi-Fi.....	7
4.1.2.1 Punto de acceso (AP).....	7
4.1.2.2 Clientes Wi-Fi .....	7
4.1.2.3 SSID (Service Set Identification) .....	7
4.1.2.4 Roaming .....	7
4.1.3 Definición WLAN (Wireless Local Área Network) .....	7
4.1.4 Evolución técnica de los protocolos 802.11: .....	8
4.1.4.1 802.11 .....	8
4.1.4.2 802.11a.....	8
4.1.4.3 802.11b.....	9
4.1.4.4 802.11g.....	9
4.1.4.5 802.11n.....	9
4.2 GENERALIDADES DE LAS ANTENAS .....	10
4.2.1 Parámetros de las Antenas.....	11
4.2.1.1 Impedancia de Entrada.....	11
4.2.1.2 VSWR y el Coeficiente de Reflexión.....	13

4.2.1.3 Patrón de Radiación.....	13
4.2.1.4 Directividad.....	16
4.2.1.5 Ganancia.....	17
4.2.1.6 Polarización.....	18
4.2.1.7 Ancho de Banda.....	19
4.2.2 Arreglos de Antenas.....	20
4.2.2.1 Antenas de Arreglos Lineales.....	21
4.2.2.2 Antenas de Arreglos en Fase.....	21
<b>4.3 TECNOLOGÍA MIMO.....</b>	<b>22</b>
4.3.1 Definición de MIMO.....	24
4.3.2 Técnicas de MIMO.....	24
4.3.2.1 Diversidad de Antenas.....	25
4.3.2.2 Multiplexación Espacial.....	27
4.3.2.3 Beamforming.....	27
4.3.3 Funcionamiento de MIMO.....	28
4.3.4 Tipos de MIMO.....	30
4.3.4.1 SU-MIMO.....	30
4.3.4.2 MU-MIMO.....	31
<b>5. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>32</b>
<b>5.1 LIMITACIONES DE LAS ANTENAS PARA REDES WLAN.....</b>	<b>32</b>
5.1.1 Antenas yagi.....	33
5.1.2 Data sheet Antena Yagi.....	41
5.1.3 Limitaciones Antenas Yagi.....	45
5.1.4 Antena Parabólica (grilla).....	46
5.1.5 Data sheet Antena grilla.....	50
5.1.6 Limitaciones Antena Parabólica (grilla).....	54
5.1.7 Antena Panel (microstrip).....	55
5.1.8 Data sheet Antena Panel.....	63
5.1.9 Limitaciones Antena Panel (microstrip).....	71
<b>5.2 ELECCIÓN DE LA ANTENA MÁS ÓPTIMA PARA REDES WLAN.....</b>	<b>72</b>
<b>5.3 DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ANTENAS MICROSTRIP.....</b>	<b>73</b>
5.3.1 Diseño de una parche microstrip rectangular.....	80
5.3.2 Diseño de un arreglo de antenas microstrip 2x2.....	87
5.3.3 Implementación de Diseños Simulados.....	98
<b>5.4 PROTOTIPO DE ARREGLOS DE ANTENAS MIMO PARA PRUEBAS EN REDES WLAN.....</b>	<b>103</b>
<b>5.5 ALGORITMOS ADAPTABLES PARA ARREGLOS DE ANTENAS MIMO.....</b>	<b>111</b>

5.5.1 Haz Conmutado.....	112
5.5.2 Haz de Seguimiento.....	114
5.5.3 Haz Adaptativo.....	115
5.6 ELECCIÓN DEL ALGORITMO ADAPTABLE ÓPTIMO PARA ARREGLOS DE ANTENAS EN REDES WLAN. ....	116
6. RESULTADOS .....	118
6.1 CUADRO COMPARATIVO DE LAS LIMITACIONES DE ANTENAS PARA REDES WLAN.....	119
6.2 ESPECIFICACIONES DEL TIPO DE ARREGLO DE ANTENAS ÓPTIMO PARA REDES WLAN. ....	120
6.3 RESULTADOS DEL DISEÑO DE ANTENAS MICROCINTA EN ARREGLO 2X2. ....	121
6.4 COMPARATIVO DE LOS ALGORITMOS ADAPTABLES PARA REDES WLAN.....	122
7. DISCUSIÓN .....	124
8. CONCLUSIONES .....	127
9. RECOMENDACIONES .....	130
10. BIBLIOGRAFÍA .....	131
11. ANEXOS .....	138

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Circuito equivalente del generador y la antena. [9] .....	12
Figura 2. Sistema de Coordenadas. [11] .....	14
Figura 3. Diagrama de Radiación Tridimensional. [7] .....	14
Figura 4. Diagrama de Radiación en coordenadas cartesianas. [7] .....	15
Figura 5. Diagrama de Radiación en coordenadas polares. [7] .....	15
Figura 6. Parámetros del Diagrama de Radiación. [11] .....	16
Figura 7. Directividad de una antena omnidireccional. [11] .....	17
Figura 8. Diagramas de radiación isotrópico, omnidireccional y directivo. [7] .....	17
Figura 9. Polarización Lineal, Circular y Elíptica. [9] .....	19
Figura 10. Arreglo de antenas con reflector y radiador. [14] .....	21
Figura 11. Evolución de la Tecnología MIMO. [17] .....	22
Figura 12. Diagrama de un sistema MIMO. [17] .....	23
Figura 13. Esquema de transmisión y recepción en sistemas MIMO. [19] .....	24
Figura 14. Diversidad en recepción a.) Selección b.) Conmutación c.) Combinación. [21] .....	26
Figura 15. Diagrama de bloques de un codificador espacio tiempo. [17] .....	26
Figura 16. Diagrama de Multiplexación Espacial. [17] .....	27
Figura 17. Diagrama de Beamforming con cuatro antenas de transmisión. [22] .....	28
Figura 18. Distorsiones presentes en el canal de comunicaciones. [17] .....	29
Figura 19. Esquema general de un sistema MIMO. [17] .....	30
Figura 20. Estructura de MU-MIMO. [24] .....	31
Figura 21. Antenas Yagi-Uda. [26] .....	33
Figura 22. Elementos de una antena Yagi. [26] .....	34
Figura 23. Distribución de elementos activos y parásitos en una antena Yagi. [27] .....	35
Figura 24. Gráfica de la ganancia de una Yagi en función de su número de elementos. [27] .....	37
Figura 25. Patrones de radiación en el plano E para un dipolo sencillo y un dipolo doblado. [29] .....	38
Figura 26. Configuraciones de arreglos Yagi. [29] .....	39
Figura 27. Patrones de radiación normalizados para arreglos Yagi. [29] .....	40
Figura 28. Antena LanPro LP-YAGI2415N. [30] .....	41
Figura 29. Especificaciones técnicas de la antena Yagi LanPro. [30] .....	42
Figura 30. Diagramas de Radiación de la Antena LanPro. [30] .....	43
Figura 31. Forma física de la antena Yagi airMax. [31] .....	43
Figura 32. Montaje de la antena airMax con el dispositivo M900 para formar arreglos MIMO 2x2. [31] .....	44
Figura 33. Especificaciones técnicas de la antena Yagi airMax. [31] .....	44
Figura 34. Principio básico de una antena parabólica. [32] .....	46
Figura 35. Geometría de una antena parabólica. [33] .....	47
Figura 36. Lóbulos secundarios debido a polarización cruzada. [33] .....	49
Figura 37. Antenas parabólicas Grillas. [34] .....	49
Figura 38. Diseño físico de la antena Grilla TL-ANT2424B. [35] .....	51
Figura 39. Especificaciones técnicas de la antena Grilla TL-ANT2424B. [35] .....	51
Figura 40. Patrón de radiación de la antena Grilla TL-ANT2424B. [35] .....	52
Figura 41. Diseño físico de la antena grilla Hyperlink HG2415G. [36] .....	53
Figura 42. Especificaciones técnicas de la antena grilla Hyperlink HG2415G. [36] .....	53
Figura 43. Patrón de radiación de la antena grilla Hyperlink HG2415G. [36] .....	54
Figura 44. Línea de microcinta y parámetros. [37] .....	56
Figura 45. Discontinuidades en las líneas: a) Línea constante b) Cambio abrupto de impedancia c) Cambio semi-abrupto de impedancia d) Unión en cruz e) Unión en L con biselado f) Unión en L con ángulo recto g) Unión en L con bisel curvo h) Unión en T con biselado. [38] .....	57
Figura 46. Plano E y H para arreglo de microcinta. [38] .....	58
Figura 47. Principales topologías de antenas Parche. [10] .....	59
Figura 48. Patrón de Radiación para arreglo de parches. [38] .....	60
Figura 49. Red de alimentación en serie. [41] .....	61
Figura 50. Red de alimentación en paralelo. [41] .....	62
Figura 51. Ancho de una antena Microstrip. [42] .....	63
Figura 52. Diseño físico integrado con el transmisor de las antenas Ubiquiti NanoStation. [43] .....	64

Figura 53. Especificaciones físicas y eléctricas de los dispositivos Ubiquiti NanoStation. [43] .....	65
Figura 54. Diseño físico del dispositivo Nano Station locoM9. [43] .....	65
Figura 55. Especificaciones técnicas de la antena del dispositivo Nano Station locoM9. [43] .....	66
Figura 56. Patrón de radiación de la antena del dispositivo Nano Station locoM9. [43] .....	66
Figura 57. Diseño físico del dispositivo NanoStation locoM2. [43] .....	66
Figura 58. Especificaciones técnicas de la antena del dispositivo NanoStation locoM2. [43] .....	67
Figura 59. Patrón de radiación de la antena del dispositivo NanoStation locoM2. [43] .....	67
Figura 60. Diseño físico del dispositivo NanoStation locoM5. [43] .....	67
Figura 61. Especificaciones técnicas de la antena del dispositivo NanoStation locoM5. [43] .....	68
Figura 62. Patrón de radiación de la antena del dispositivo NanoStation locoM5. [43] .....	68
Figura 63. Diseño físico del dispositivo NanoStationM2. [43] .....	68
Figura 64. Especificaciones técnicas de la antena del dispositivo NanoStationM2. [43] .....	69
Figura 65. Patrón de radiación de la antena del dispositivo NanoStationM2. [43] .....	69
Figura 66. Diseño físico del dispositivo NanoStationM2/M365. [43] .....	69
Figura 67. Especificaciones técnicas de la antena del dispositivo NanoStationM2/M365. [43] .....	70
Figura 68. Patrón de radiación de la antena del dispositivo NanoStationM2/M365. [43] .....	70
Figura 69. Diseño físico del dispositivo NanoStationM5. [43] .....	70
Figura 70. Especificaciones técnicas de la antena del dispositivo NanoStationM5. [43] .....	71
Figura 71. Patrón de radiación de la antena del dispositivo NanoStationM5. [43] .....	71
Figura 72. Banda ISM en la frecuencia de 2.4GHz. [44] .....	74
Figura 73. Longitudes físicas y efectivas de una parche de microcinta. [46] .....	76
Figura 74. Punto de alimentación del parche microstrip. [46] .....	78
Figura 75. Presentación del script de Matlab.....	78
Figura 76. Interfaz del software CST Microwave Studio.....	80
Figura 77. Datos de ingreso en el script de Matlab.....	80
Figura 78. Resultados de las dimensiones del parche microstrip.....	81
Figura 79. Diseño de la antena microstrip en CST.....	82
Figura 80. Pérdidas por retorno y frecuencia de resonancia.....	83
Figura 81. Carta de Smith de acople de impedancia de entrada.....	84
Figura 82. Impedancia de Entrada Z, Parte Real e Imaginaria.....	84
Figura 83. Razón de voltaje de onda estacionario VSWR.....	85
Figura 84. Patrón de radiación del parche.....	85
Figura 85. Patrón de radiación polar en 90 grados.....	86
Figura 86. Patrón de radiación polar en 0 grados.....	86
Figura 87. Arreglo 2x2 con red de alimentación en paralelo. [9] .....	87
Figura 88. Separación en el plano E y H. [9].....	88
Figura 89. Funcionamiento de divisores de impedancia en la red en paralelo. [9] .....	88
Figura 90. Acople de impedancias. [48].....	89
Figura 91. Diseño de la red de acople para el arreglo 2x2. [44].....	90
Figura 92. Tablas para obtener el ancho de línea para Zo y Z. [49] .....	91
Figura 93. Diseño del parche con impedancia de entrada 100Ohm.....	91
Figura 94. Impedancia de Entrada Z, Parte Real.....	92
Figura 95. Impedancia de Entrada Z, Parte Imaginaria.....	92
Figura 96. Patrón de radiación asimétrico del arreglo 2x2.....	94
Figura 97. Desfase eléctrico de la posición del puerto del arreglo 2x2.....	94
Figura 98. Patrón de radiación simétrico del arreglo 2x2.....	95
Figura 99. Patrón de radiación polar en 0 grados.....	96
Figura 100. Patrón de radiación polar en 90 grados.....	96
Figura 101. Frecuencia de resonancia del arreglo 2x2 en simulación CST.....	97
Figura 102. Razón de voltaje estacionario en el arreglo 2x2.....	97
Figura 103. Impedancia de Entrada Z, Parte Real e Imaginaria del Arreglo 2x2.....	98
Figura 104. Implementación de prototipo de Antena tipo parche rectangular.....	100
Figura 105. Conexión de la antena al extremo del Pigtail.....	101
Figura 106. Implementación de prototipo de Antena tipo parche arreglo 2x2.....	102
Figura 107. Conexión del pigtail al conector rp-sma de la antena 2x2.....	103
Figura 108. Diagrama de conexión del prototipo de arreglo de antenas MIMO.....	104
Figura 109. Configuración de la tarjeta de red de la computadora conectada al router M_POT_AB.....	105

Figura 110. Distancia y posición de los routers para las pruebas pertinentes.....	106
Figura 111. Ingreso de la IP del router M_POT_AB en el explorador. ....	106
Figura 112. Interfaz del software DD-WRT implementado en los routers .....	107
Figura 113. Información de software y hardware del router con interfaz DD-WRT.....	108
Figura 114. Interfaz de la herramienta Inalámbrico. ....	109
Figura 115. Interfaz de la pestaña Inspección de Sitios.....	110
Figura 116. Presentación de la herramienta Ancho de Banda y sus Monitores.....	111
Figura 117. Tipos de alcances de las Antenas Inteligentes. [50].....	112
Figura 118. Haz Conmutado. [19] .....	113
Figura 119. Haz de seguimiento. [19].....	114
Figura 120. Haz Adaptativo. [19] .....	115
Figura 121. Haz directo y lóbulos secundarios por multitrayecto. [50] .....	116

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cuadro comparativo entre los principales estándares IEEE 802.11. ....	10
Tabla 2. Comparación entre los diferentes métodos de alimentación. ....	59
Tabla 3. Características de diseño del arreglo microstrip. ....	74
Tabla 4. Comparación de software con sus características para elección del más idóneo. 79	
Tabla 5. Dimensiones del parche para resonar a 2.4 GHz. ....	81
Tabla 6. Dimensiones del parche optimizado para resonar a 2.4 GHz.....	82
Tabla 7. Dimensiones para el diseño en AutoCAD del arreglo 2x2. ....	93
Tabla 8. Lista de Materiales para Implementación. ....	99
Tabla 9. . Configuración de cada router del Prototipo de Prueba.....	105
Tabla 10. Limitaciones de tres tipos de antenas para redes WLAN. ....	119
Tabla 11. Especificaciones de las antenas Microstrip. ....	120
Tabla 12. Datasheet del arreglo microstrip 2x2 a 2.437 GHz. ....	121
Tabla 13. Comparación de los algoritmos para las técnicas de Antenas Inteligentes. ....	122

## NOMENCLATURA

<b>WLAN</b>	Red de Area Local Inalámbrica.
<b>MIMO</b>	Múltiples Entradas Múltiples Salidas.
<b>ISM</b>	Industrial, Científica y Médico.
<b>FFC</b>	Comisión Federal de Comunicaciones.
<b>IEEE</b>	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
<b>WiFi</b>	Wireless Fidelity (Fidelidad Inalámbrica).
<b>AP</b>	Punto de Acceso.
<b>SSID</b>	Service Set Identifier (Nombre de la red inalámbrica).
<b>PDA</b>	Personal Digital Assistant (asistente digital personal).
<b>OSI</b>	El modelo de interconexión de sistemas abiertos.
<b>PHY</b>	Protocolo de Capa Física (interfaz entre el MAC y el medio inalámbrico)
<b>MAC</b>	Control de Acceso al Medio.
<b>BSA</b>	Area de Servicios Básicos.
<b>BSS</b>	Conjunto de Servicios Básicos
<b>DS</b>	Sistema de Distribución.
<b>ESS</b>	Conjunto de Servicios Extendidos.
<b>CSMA/CA</b>	Acceso múltiple con escucha de portadora y evasión de colisiones.
<b>OFDM</b>	La Multiplexacion por División de Frecuencias. Ortogonales
<b>VSWR</b>	Cociente de onda de voltaje permanente.
<b>NLPS</b>	Relación de Lóbulo Principal a Secundario.
<b>WIMAX</b>	Interoperabilidad para el Acceso a Microondas.
<b>HSDPA</b>	Acceso de alta velocidad para paquetes Downlink.
<b>UMTS</b>	Sistema universal de telecomunicaciones móviles.
<b>BER</b>	Tasa de error de bits.
<b>STC</b>	Codificación Espacio Tiempo.
<b>DSP</b>	Procesador Digital de Señales.
<b>SU-MIMO</b>	Simple Usuarios MIMO.
<b>MU-MIMO</b>	Múltiples usuarios MIMO.

<b>SDMA</b>	Acceso múltiple por división de espacio.
<b>VHF</b>	Muy alta frecuencia.
<b>UHF</b>	Ultra alta frecuencia.
<b>FM</b>	Frecuencia Modulada.
<b>HF</b>	Alta Frecuencia.
<b>SHF</b>	Súper alta Frecuencia.
<b>EHF</b>	Frecuencia extremadamente alta.
<b>CPE</b>	Equipo Local del Cliente.
<b>ISP</b>	Proveedor de Servicio de Internet.
<b>TDMA</b>	Acceso Múltiple por división de tiempo.
<b>FDTD</b>	Método de las Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo.

## **1. TÍTULO**

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE ARREGLO  
DE ANTENAS MIMO PARA PRUEBAS EN REDES  
WLAN.**

## 2. RESUMEN

El presente trabajo de tesis consiste en el DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE ARREGLO DE ANTENAS MIMO PARA PRUEBAS EN REDES WLAN.

El presente informe tiene como propósito dar a conocer aspectos teóricos sobre las limitaciones de las antenas actuales para WLAN y desarrollo de un prototipo de prueba en redes WLAN para obtener resultados en lo concerniente al diseño simulación e implementación de antenas.

Se elegirá el tipo de antenas más óptima para redes WLAN de donde se desarrollara un prototipo dando paso a su diseño, simulación e implementación.

La simulación del tipo de antena elegido se realizará en el software CST de Microwave para validar los diseños, la simulación dará a conocer parámetros característicos de cada diseño de antenas como son: parámetros s11 (frecuencia de resonancia, VSWR) y sus respectivos diagramas de radiación los cuales serán evaluados para decidir su implementación.

Finalmente se desarrolla un análisis de elección de la mejor técnica de algoritmos adaptables para prototipos de antenas dentro de las WLAN.

A fin de sustentar lo anteriormente descrito se utilizó herramientas de los routers, a los cuales se les cambio el firmware propio por el de DDWRT, este nos permite obtener datos que nos ayudan a sustentar los objetivos propuestos.

## **2.1 SUMMARY**

This thesis is the DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE ANTENNA ARRAY MIMO WLAN NETWORK TESTING.

This report aims to present theoretical aspects of the limitations of existing antennas for WLAN and development of a prototype test for WLANs results concerning the simulation and implementation of antenna design.

The type of optimum antennas for WLAN networks where giving way to design, simulation and implementation developed prototype will be chosen.

Simulation type of antenna chosen will be held in the CST software Microwave to validate designs, the simulation will release characteristic parameters of each antenna design such as: parameters S11 (resonance frequency, VSWR) and their respective radiation patterns which they will be evaluated to determine their implementation.

Finally, an analysis of choosing the best technique of adaptive algorithms for prototypes antennas within the WLAN develops.

To support tools described above was used routers, which are to change the own firmware that of DDWRT, this allows us to obtain data that help us support the objectives.

### 3. INTRODUCCIÓN

El avance de la tecnología en base a sistemas de comunicaciones inalámbricos ha ocasionado una gran demanda en la comunidad actual, junto con el continuo desarrollo de unos de sus elementos principales que son sus antenas tanto en calidad y eficiencia para aplicaciones específicas como son las redes WLAN.

Las antenas constituyen uno de los dispositivos más importantes dentro de las radiocomunicaciones, y sus parámetros característicos influyen de forma relevante en las propiedades de un radioenlace u otra aplicación.

Los sistemas inalámbricos que operan en la banda ISM, y bajo el estándar 802.11 n (MIMO) pueden utilizar diversidad de antenas, tales como antenas helicoidales, reflectores parabólicos, arreglo de dipolos entre otros. Este proyecto se enfoca primero en encontrar las limitaciones de las antenas actuales, elegir el mejor tipo de antenas, desarrollar un prototipo mediante diseño y simulación, finalmente elegir la técnica de algoritmo más adaptable para las redes WLAN.

## **4. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **4.1 HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LAS REDES WLAN**

Las redes y conexiones inalámbricas se convierten en una buena elección cuando no se quiere depender de un enlace físico y sobre todo se quiere disponer de movilidad en las comunicaciones.

El potencial de esta clase de redes surgió ya hace algunos años en donde aparecieron los primeros dispositivos que utilizaban las ondas de radio para comunicarse e interconectar ordenadores o dispositivos de red. Los primeros sistemas era lentos a que dependían tanto de implementación y conectividad a su fabricante, contaban con velocidades de 1.5 Mb/s se podía trabajar en un pool reducido de aplicaciones. Pero el desarrollo de la tecnología en los últimos años ha potenciado las comunicaciones inalámbricas dando soluciones ampliamente estandarizadas funcionales en donde se puede comunicar distintos dispositivos de diversa naturaleza y capacidades mediante el uso de ondas de radio a través del medio ambiente.

Los laboratorios de IBM en 1970 fueron los primeros en brindar avances tecnológicos referentes a comunicaciones inalámbricas. IBM propone una red de datos inalámbrica basada en luz infrarroja, al mismo tiempo su competencia HP en California proponían una red inalámbrica de 100Kb/s operando en la banda de 900MHz. [1]

En la época del desarrollo de las redes inalámbricas no había bandas de frecuencia libres por lo que era su principal desventaja para poder surgir como tecnología y tanto IBM como HP concluyeron que se necesitaría un ancho de banda de varias decenas de MHz para que las redes inalámbricas funcionen de forma eficiente.

Para beneficio de la tecnología inalámbrica en 1985 la FCC libera algunas bandas no licenciadas a las cuales las denomino Bandas ISM (Industrial, Scientific and

Medical band) Estas fueron las primeras bandas de frecuencia no licenciadas para desarrollos de productos comerciales, y jugaron un papel fundamental en el desarrollo de las WLAN.

Teniendo bandas libres para desarrollar avances en el ámbito de las redes inalámbricas se empezó a estandarizar dicha tecnología en 1987 IEEE designa un grupo 802.4L para estudiar la tecnología WLAN y en 1990 el grupo se transforma en IEEE 802.11 teniendo la categoría de un estándar independiente publicando el primer estándar en 1999 nombrándolo Recomendación IEE 802.11 dando inicio a la creación del Wi-Fi. [2]

#### **4.1.1 La creación del estándar Wi-Fi**

El primer estándar de protocolo de comunicaciones WLAN lo generó el organismo IEEE en el año 1997 y se denomina IEEE 802.11 o WIFI el cual define el uso de los dos primeros niveles de la arquitectura OSI.

La palabra Wi-Fi viene de la abreviatura Wireless Fidelity es utilizado de forma general para todos los dispositivos que trabajen inalámbricamente con el estándar 802.11, al inicio la expresión Wi-Fi fue creado para referirse a dispositivos con tecnología 802.11b, el cual era una variante del estándar 802.11 que dominaba en aceptación en el desarrollo de las redes inalámbricas el cual funcionaba en la banda de 2.4GHz y posee una velocidad de 11Mbps.

El termino Wi-Fi se extendió para todos los dispositivos que posean cualquier variante de la tecnología 802.11 ya sea 802.11a, 802.11b, 802.11g, para poder evitar confusiones en la compatibilidad e interoperabilidad en las redes. [3]

## **4.1.2 Conceptos básicos del Wi-Fi**

### ***4.1.2.1 Punto de acceso (AP)***

Es un dispositivo cuya función es enlazar o servir de puente entre una red cableada y una red inalámbrica dando acceso a los usuarios a todos los servicios de la red. [4]

### ***4.1.2.2 Clientes Wi-Fi***

Son todos los dispositivos PDA, Portátiles o equipos de sobremesa con tarjetas Wi-Fi que puedan conectarse a una red inalámbrica. [4]

### ***4.1.2.3 SSID (Service Set Identification)***

Es un identificador de red inalámbrica o nombre de la red radiada a la cual se conectan los clientes Wi-Fi para pertenecer a la misma red y diferenciarla de otras redes. [4]

### ***4.1.2.4 Roaming***

Es una propiedad de las redes inalámbricas, la cual permite movilidad dentro de una red cambiando de AP por disminución de señal de potencia sin ser perceptible a los usuarios. [4]

## **4.1.3 Definición WLAN (Wireless Local Area Network)**

Las redes WLAN se diferencian de las convencionales principalmente en la capa física y en la capa de enlace de datos, según el modelo de referencia OSI. La capa Física (PHY) indica cómo son enviados los bits de una estación a otra. La capa de Enlace de Datos y de control de acceso al medio (MAC) se encarga de describir cómo se empaquetan y verifican los bits de manera que no tengan errores.

Las redes WLAN están basadas en una arquitectura del tipo celular, dónde el sistema se subdivide en celdas o células. Cada celda (llamada BSA = Basic Service Area) se corresponde con el área de cobertura de una estación base o punto de acceso (AP). El conjunto de terminales o dispositivos controlados por un AP se conoce como BSS = Basic Service Set. [2]

Una WLAN puede estar formada por una única celda, conteniendo un único punto de acceso AP, o por un conjunto de celdas cada una con su punto de acceso, los que a su vez se interconectan entre sí a través de un backbone, llamado sistema de distribución (DS). Este backbone es típicamente Ethernet, generalmente cableado, pero en algunos casos puede ser también inalámbrico.

El conjunto de terminales inalámbricos contenido dentro de varias DSA se conoce como ESS (Extended Service Set). La WLAN completa incluyendo las diferentes celdas, sus respectivos AP y el DS es vista como una única red 802 hacia las capas superiores del modelo OSI. [4]

#### **4.1.4 Evolución técnica de los protocolos 802.11:**

##### ***4.1.4.1 802.11***

Estándar original de la IEEE conocido, aprobado en el año 1997 también como 802.11 legacy, especifica velocidades de transmisión teóricas de 1 a 2Mbps que se transmiten por señales infrarrojas en la banda de ISM a 2.4Ghz, define el protocolo CSMA/CA (Carrier sense multiple access with collision avoidance) como método de acceso. [5]

##### ***4.1.4.2 802.11a***

Estándar conocido como WIFI5. Aprobado en el año 1999, usa el mismo juego de protocolos que el estándar original, opera en la banda de 5Ghz, utiliza 52 subportadoras OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing), opera con un ancho de banda de canal de 25Mhz y ofrece una velocidad de transmisión teórica

de hasta 54Mbps y una velocidad mínima de 25Mbps. Teniendo un alcance en interiores de 30 metros y en espacio libre de 100 metros. Cuenta con 12 canales no solapados, 8 para red inalámbrica y 4 para conexiones punto a punto. [5]

#### **4.1.4.3 802.11b**

Estándar aprobado en el año 1999. Ofrece una velocidad teórica máxima de 11Mbps, opera con un ancho de banda de canal de 25Mhz y utiliza el método de acceso CSMA/CA. Opera en la banda ISM de 2.4Ghz y utiliza la interfaz aire DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) [5]. Debido al espacio ocupado por la codificación del protocolo CSMA/CA, es que se obtiene una velocidad real de 5.9Mbps. Teniendo un alcance en interiores de 30 metros y en espacio libre de 100 metros. [6]

#### **4.1.4.4 802.11g**

Surge como evolución del estándar 802.11b es un estándar aprobado en el año 2003. De esta manera 802.11g ofrece una velocidad teórica máxima de 54Mbps en la banda de 2.4Ghz aunque la velocidad de transmisión real sea de 24.7Mbps, sus interfaces aire son DSSS y OFDM. Al ser compatible con 802.11b, utiliza las mismas frecuencias de operación, de esta manera 802.11g reemplaza a 802.11b en las redes inalámbricas. [6]

#### **4.1.4.5 802.11n**

Surge como evolución del estándar 802.11g, es un estándar aprobado en el 2008. De esta manera 802.11n ofrece una velocidad teórica máxima de 540Mbps en las bandas de 2.4Ghz y 5Ghz otorgando una velocidad mínima de transmisión de 100Mbps y tiene un radio de cobertura de 300Km. Usa una modulación de 16QA y 64QAM. Es compatible con el estándar 802.11b/g por ende utiliza las mismas frecuencias de operación, se propone una convivencia con los estándares 802.11b/g para una correcta administración del ancho de banda, hacen uso de la tecnología MIMO (Multiple-input/Multipleoutput) y trabajan en canales de 20Mhz con opción a doble banda de 40Mhz. [6]

**Tabla 1. Cuadro comparativo entre los principales estándares IEEE 802.11.**

<b>PROTOCOLO</b>	<b>RELEASE DATE</b>	<b>OP. FRECUENCIA</b>	<b>VELOCIDAD DE DATOS Típica</b>	<b>VELOCIDAD DE DATOS Max</b>	<b>Alcance en interiores</b>
<b>802.11<sup>a</sup></b>	1999	5.15-5.875 GHz	25 Mbps	54 Mbps	30 m -100 libre
<b>802.11b</b>	1999	2.4 – 2.5 GHz	6 Mbps	11 Mbps	30 m -100 libre
<b>802.11g</b>	2003	2.4 – 2.5 GHz	25 Mbps	54 Mbps	30 m -100 libre
<b>802.11n</b>	2008	2.4 o 5GHz	100 Mbps	540 Mbps	50 m -300 libre

**Fuente: Acceso a Internet vía Wi-Fi WiMax, Estudio del Impacto de IEEE802.11n sobre las Redes Wireless en el Perú.**

#### **4.2 GENERALIDADES DE LAS ANTENAS**

El instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos define a una antena como aquel elemento de un transmisor o receptor diseñado específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas. [7]

Cuando una antena está irradiando energía que se le ha suministrado a través de una guía de onda en forma de ondas electromagnéticas, se dice que está funcionando como antena transmisora. En el caso contrario cuando la antena está absorbiendo energía de una onda electromagnética en algún punto del espacio para entregarla al receptor a través de la guía de onda la antena está funcionando como receptora. [8]

Las antenas tienen la misión o responsabilidad de radiar la potencia entregada por el transmisor con la direccionalidad que requiera el enlace o la aplicación que se le esté dando a la transmisión. Es por eso que hay distintos diseños de antenas para

diferentes aplicaciones en donde se puede encontrar antenas direccionales y omnidireccionales. [8]

Por ejemplo para aplicaciones de radiodifusión, comunicaciones móviles y wifi se requiere irradiar sobre una zona de cobertura en todas las direcciones, para lo que se necesita antenas omnidireccionales. Mientras que las antenas direccionales se las utiliza para enlaces entre dos lugares específicos como: enlaces punto a punto (servicio de internet), enlaces satelitales y enlaces dedicados para transmisión de datos. [7][8]

Las antenas poseen características de impedancia, radiación y ganancia las cuales dependen de la frecuencia de trabajo, sus análisis se realiza sobre las ecuaciones de Maxwell utilizando las ecuaciones de campos radiados. Todas estas características se vuelven particulares de cada antena dependiendo de la aplicación y la frecuencia de trabajo lo que da lugar a una diversidad en cuestión de tipos de antenas. En resumen los tipos son: antenas alámbricas, antenas de apertura, reflectores y agrupaciones de antenas. [7]

#### **4.2.1 Parámetros de las Antenas**

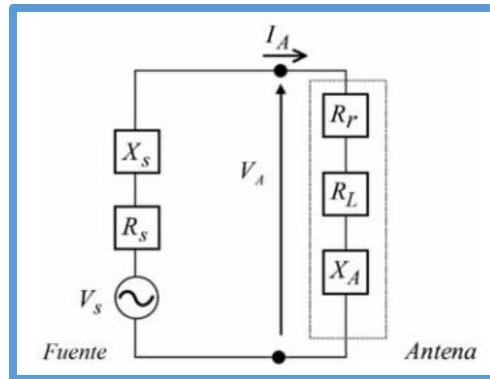
Los parámetros de las antenas son características que permiten encontrar diferencias para deducir ventajas y desventajas de aplicación de cada antena. Estos parámetros permiten elegir la antena más óptima según las necesidades de transmisión y alcance. [9]

Las propiedades más importantes son: impedancia de entrada, patrón de radiación, intensidad de radiación, directividad, ganancia, polarización y ancho de banda.

##### ***4.2.1.1 Impedancia de Entrada***

La impedancia de la antena es un parámetro que depende de las dimensiones y la forma de los elementos que la componen. La impedancia de la antena es una razón

de voltaje a corriente generando una impedancia en los terminales de la antena, en la siguiente figura se muestra e circuito equivalente. [9]



**Figura 1. Circuito equivalente del generador y la antena. [9]**

La impedancia de la antena se expresa con las siguientes ecuaciones.

$$Z_{ant} = R_A + jX_A \quad (4.2.1)$$

$$R_A = R_r + R_L \quad (4.2.2)$$

Donde:

$R_A$  = Resistencia de la Antena

$X_A$  = Reactancia de la antena

$R_r$  = Resistencia de radiación

$R_L$  = Pérdidas resistivas debido al conductor dieléctrico

La potencia radiada está calculada con la resistencia de radiación mientras que las pérdidas resistivas disipan en forma de calor parte de la potencia radiada. La reactancia debe cancelarse para que la antena se comporte como un elemento radiador a cierta frecuencia es decir la impedancia de la antena será puramente resistivo en caso ideal lo cual también indica que el circuito está en fase. [9]

#### **4.2.1.2 VSWR y el Coeficiente de Reflexión**

La razón de voltaje de onda estacionaria se define como la magnitud del voltaje máximo en la línea a la magnitud del mínimo voltaje en la línea. El caso ideal es tener la línea de transmisión acoplada a la impedancia de entrada de la antena para evitar que se generen ondas estacionarias por reflexiones. No siempre es posible acoplar de manera perfecta la antena a la línea de transmisión, el VSWR indica una medida del nivel de acoplamiento.

El VSWR se expresa con la siguiente ecuación.

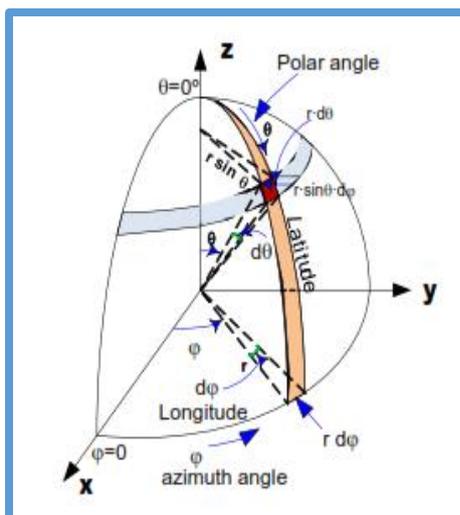
$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (4.2.3)$$

$\Gamma$  = Coeficiente de reflexión (Relación de amplitudes de voltaje reflejado y transmitido).

Al ser mayor a 1 el VSWR esto significa que el acoplamiento es imperfecto, para que el acoplamiento tienda a lo óptimo este valor debe acercarse a 1, es decir  $|\Gamma| = 0$ . [10]

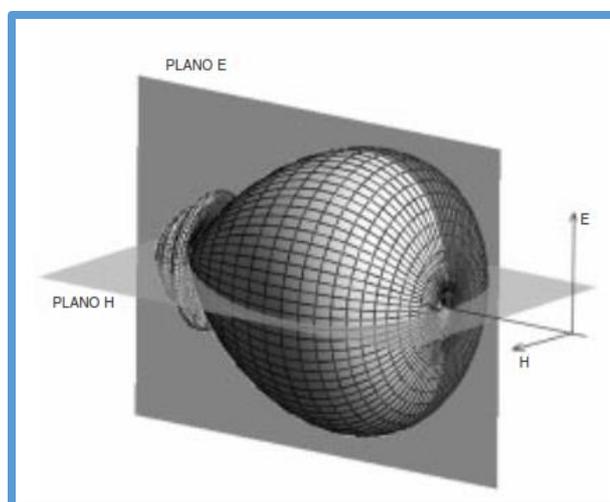
#### **4.2.1.3 Patrón de Radiación**

Las propiedades de radiación de una antena se las puede representar de forma gráfica mediante un diagrama de radiación, este diagrama de radiación se representa en coordenadas esféricas en función de las direcciones del espacio a una distancia específica. [7]



**Figura 2. Sistema de Coordenadas. [11]**

Las variables de las coordenadas esféricas están en función del campo eléctrico, como son magnitudes vectoriales se lo determinara en todas las direcciones de la esfera de radio específico y para esto se sitúa la antena en el origen del sistema de coordenadas.

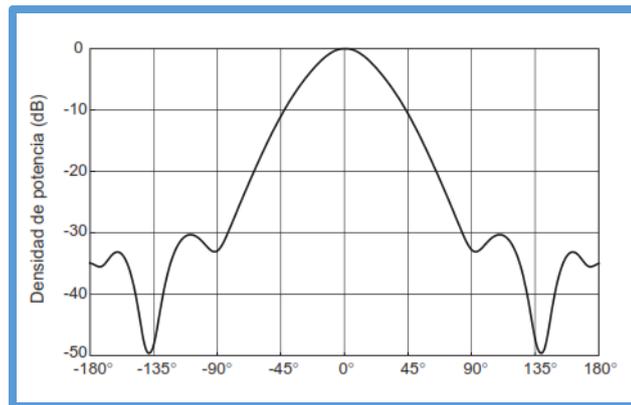


**Figura 3. Diagrama de Radiación Tridimensional. [7]**

La figura anterior muestra un diagrama de radiación tridimensional de una antena y los planos E y H, las antenas linealmente polarizadas definen el plano E como el que forma la dirección de máxima radiación y el campo eléctrico en dicha dirección, análogamente es lo mismo para el campo magnético. Ambos planos eléctrico y

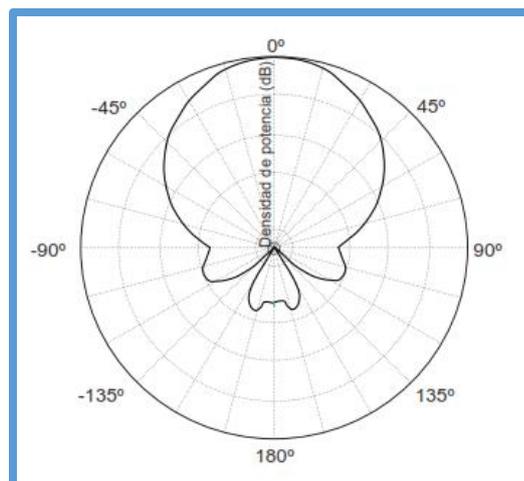
magnético son perpendiculares y su intersección determina una línea que define la dirección de máxima radiación de la antena. [7]

El diagrama de radiación también se lo puede representar en coordenadas cartesianas ya que permite observar detalles de radiación en antenas muy directivas. [7]



**Figura 4. Diagrama de Radiación en coordenadas cartesianas. [7]**

Las coordenadas polares también son una excelente forma para observar un patrón de radiación cuando se quiere tener un mayor detalle en la distribución de la potencia en distintas direcciones.

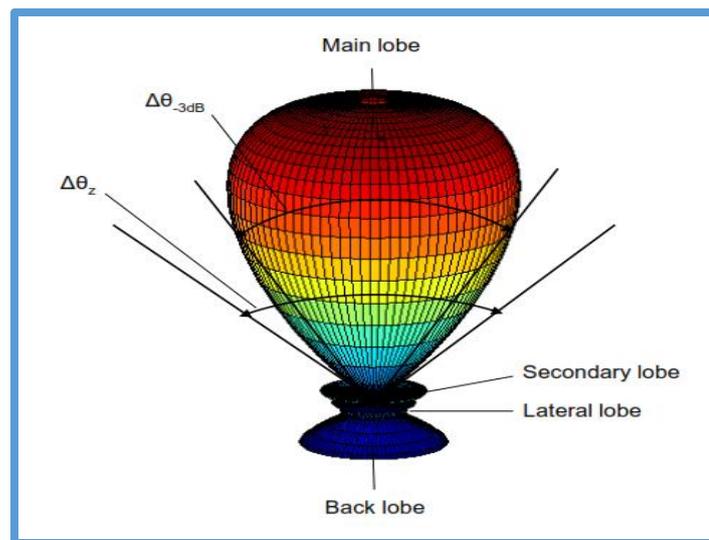


**Figura 5. Diagrama de Radiación en coordenadas polares. [7]**

En las figuras anteriores en sus distintos tipos de coordenadas respectivamente, podemos notar que en un punto hay la mayor radiación, la cual se denomina lóbulo principal y todos los lóbulos de menor radiación que rodean al principal se llaman lóbulos laterales, el lóbulo lateral de mayor amplitud se denomina lóbulo secundario.

Existen parámetros dentro del diagrama de radiación que permiten descifrar los distintos lóbulos de mejor manera.

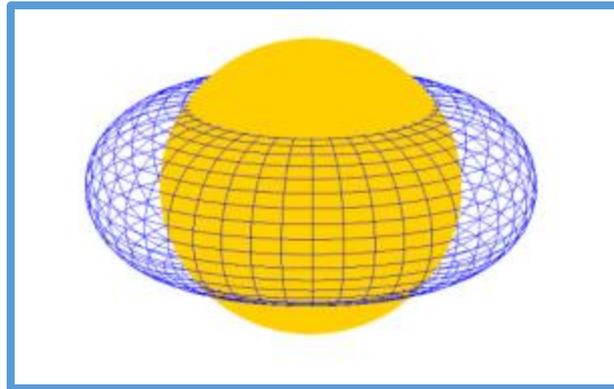
- Ancho de haz a -3 dB.  $\Delta\theta_{-3dB}$
- Ancho de haz entre ceros.  $\Delta\theta_z$
- Relación de lóbulo principal a secundario. *NLPS*



**Figura 6. Parámetros del Diagrama de Radiación. [11]**

#### ***4.2.1.4 Directividad***

La directividad de una antena se expresa como “ la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia dada, y la densidad de potencia que radiaría a esta misma distancia una antena isotrópica que radiase la misma potencia que la antena transmisora “. [11] [12]



**Figura 7. Directividad de una antena omnidireccional. [11]**

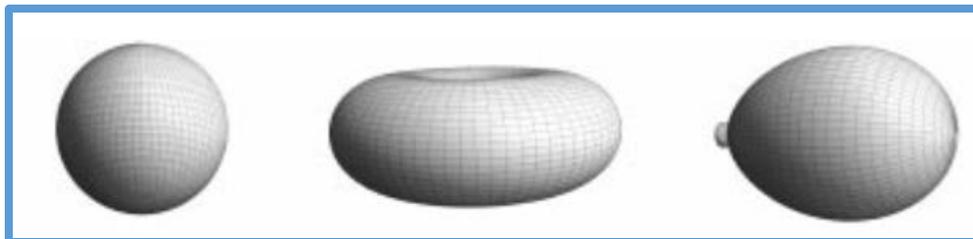
$$D_o = \frac{4\pi \cdot U}{P_{rad}} \quad (4.2.4)$$

$D_o$  = Directividad máxima (adimensional)

$U$  = Máxima intensidad radiada (W)

$P_{rad}$  = Potencia radiada (W)

Existen varios tipos de directividad según la dirección o la forma del diagrama de radiación, estos pueden ser isotrópico, omnidireccional y direccional. [13]



**Figura 8. Diagramas de radiación isotrópico, omnidireccional y direccional. [7]**

#### **4.2.1.5 Ganancia**

La ganancia de una antena es otro parámetro que describe el rendimiento de una antena y está relacionado directamente con la directividad y representa la razón de la intensidad de radiación en una dirección, a la intensidad de radiación de una antena que radia de manera isotrópica, es decir que toma en cuenta la eficiencia de la antena así como sus capacidades de dirección. [9] [10]

La ganancia se expresa con la siguiente ecuación:

$$G = \frac{4.\pi.U}{P_{ent}} \quad (4.2.5)$$

Donde:

$G$  =Ganacia de la antena (adimensional 0 en dBi).

$U$  = Intensidad radiada en una dirección (W).

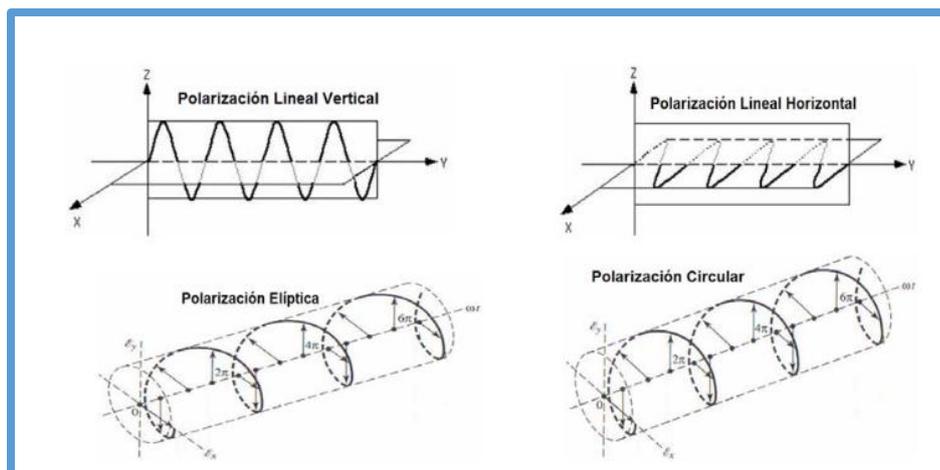
$P_{ent}$  =Potencia de entrada (W)

Cabe recalcar que la potencia de entrada a la antena jamás podrá ser superada por la potencia radiada ya que la ganancia de la antena no amplifica la potencia, solo concentra la potencia en una dirección específica por ende reduciéndola en las demás direcciones. Es por eso que tanto la antena transmisora como la receptora deben apuntar siempre a donde desee radiar la potencia o apuntar a donde se requiera la recepción. [14]

#### **4.2.1.6 Polarización**

La polarización de una antena se define en la dirección en la que la antena radia el máximo de potencia es decir la polarización de la onda radiada cuando la antena se encuentra excitada. Todos los enlaces de transmisión se diseñan para que sean eficientes en la dirección de mayor radiación de la antena, la polarización de la onda radiada varía con la dirección respecto al centro de la antena. [11]

Existen varios tipos de polarización los cuales dependerán de la aplicación del enlace.



**Figura 9. Polarización Lineal, Circular y Elíptica. [9]**

Podemos notar en la figura anterior que la polarización de una onda radiada, se define como el vector del campo eléctrico que se mueve en función del tiempo sobre un punto fijo en el espacio. [9]

#### **4.2.1.7 Ancho de Banda**

Se define al ancho de banda como el rango de frecuencias en donde el rendimiento de la antena con respecto a su aplicación o tecnología se ajusta a ciertas características específicas. [10]

El ancho de banda se lo puede expresar con respecto a la impedancia se mide en porcentaje de la frecuencia central para un intervalo de frecuencias donde el VSWR sea menor a 2 o con pérdidas por retorno inferiores a -10dB. [12]

$$\%BW = \frac{F_{VSWR}}{F_c} \times 100 \quad (4.2.6)$$

Donde:

$\%BW$  = Ancho de Banda (%)

$F_{VSWR}$  = Intervalo de frecuencias donde VSWR menor a 2

$F_c$  = Frecuencia central (Hz)

Otra forma de definir el ancho de banda es mediante el ancho de banda fraccional y se expresa con la siguiente ecuación. [12]

$$FBW = \frac{F_H - F_L}{F_c} \quad (4.2.7)$$

Donde:

$FBW$  = Ancho de Banda

$F_H, F_L$  = Frecuencia de corte superior e inferior.

$F_c$  = Frecuencia central (Hz)

#### 4.2.2 Arreglos de Antenas

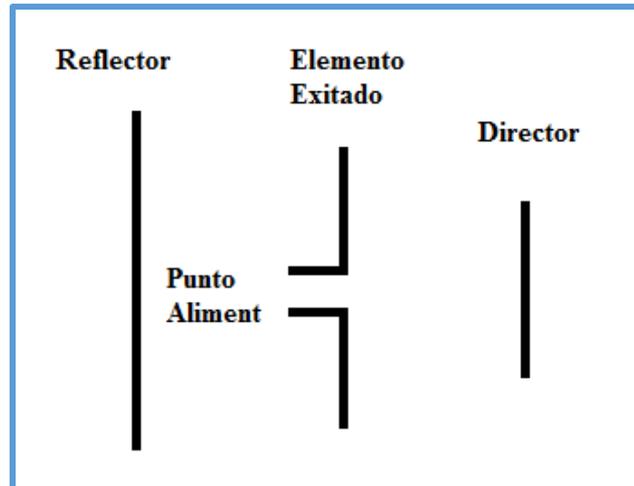
Un arreglo de antenas se basa en la agrupación de elementos radiadores para conformar una sola antena, estos elementos radiadores se colocan de tal forma para que sus campos de radiación conformen un solo campo con características de ganancia y directividad mejores a los de los elementos individuales para así concentrar la potencia radiada dentro de una zona de cobertura más pequeña. [14]

En un arreglo de antenas existen dos tipos de elementos: elementos excitados y elementos no excitados o paracitos. [14]

Los elementos excitados se conectan directamente a la línea de transmisión recibiendo potencia de la fuente, en cambio los elementos no excitados o paracitos no están conectados a la línea de transmisión, reciben radiación por inducción de parte del elemento radiador u otro elemento no excitado.

Cuando un elemento parasito es de mayor longitud que el elemento radiador se denomina reflector. La función de un reflector es reducir la intensidad de radiación en su dirección y aumentarla hacia el lado opuesto, es decir la onda que incide sobre el reflector se desfasa, y por ende vuelve a irradiar la energía recibida en dirección de la radiación del elemento radiador. [14]

Un elemento no excitado de menor longitud que elemento radiador se denomina director, el cual incrementa la intensidad de radiación en su dirección y la reduce en el sentido opuesto, se puede aumentar la directividad dependiendo de la colocación de directores ya sea en el plano horizontal o vertical. [14]



**Figura 10. Arreglo de antenas con reflector y radiador. [14]**

Existen diferentes formas de conformar arreglos para obtener aumento en la ganancia directiva pero los años de investigación de este campo los han reducido a dos formas óptimas de conseguir un arreglo de antenas.

#### ***4.2.2.1 Antenas de Arreglos Lineales***

Este método se basa en la conformación de un arreglo de varias antenas individuales separadas en fase de tal forma que sus campos de radiación se sumen en una dirección requerida mientras se cancelan en otras.

#### ***4.2.2.2 Antenas de Arreglos en Fase***

Las antenas de arreglo en fase no necesitan mover físicamente ninguno de sus elementos radiadores para cambiar su patrón de radiación esto se logra electrónicamente ya que son un grupo de antenas o grupo de arreglos de antenas que cuando se conectan funcionan como una sola, su funcionamiento se basa en la

interferencia de las ondas electromagnéticas es decir cuando las energías electromagnéticas de diferentes fuentes ocupan el mismo espacio al mismo tiempo se combinan, a veces en forma constructiva y también puede suceder lo contrario oponiéndose entre sí. [14]

### 4.3 TECNOLOGÍA MIMO

Las redes inalámbricas han logrado un éxito temprano en extensiones considerables como en lugares domésticos u oficinas, debido a su movilidad y bajo costo de implementación, pero sus velocidades a un no superan a la de una red cableada pero los sistemas MIMO están acortando esa diferencia con el objetivo de igualarlas. [17]

La tecnología MIMO se viene desarrollando de hace ya tiempo y se publicó el estándar en el 2008 en la siguiente figura se hace un resumen de su historia. [17]

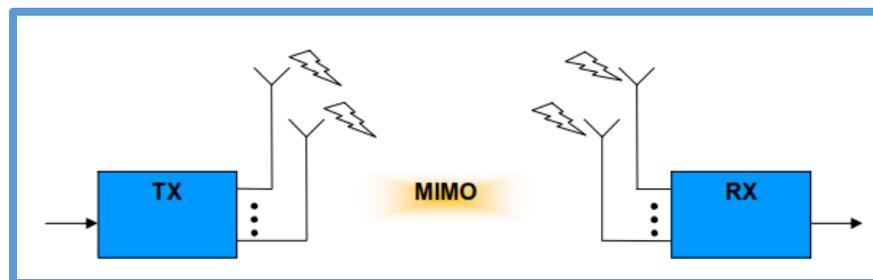
Fecha	Evento
Años 70	A. R. Kaye , D. A. George y W. Van Etten realizan las primeras investigaciones
1984-1986	Los Laboratorios Bell, por medio de Jack Winters y Jack Salz, publicaron numerosos artículos acerca de aplicaciones donde podría ser útil el "beamforming" o conformación de los haces de antena
1994	A. Paulraj y T. Kailath, profesores de la Universidad de Stanford (California, EEUU), propusieron el concepto de "Multiplexación Espacial" y destacaron sus numerosas aplicaciones en comunicaciones inalámbricas. La Universidad de Stanford patentó la "Spacial Multiplexing" o Multiplexación Espacial.
1996	Rayleigh y Foschini, de los laboratorios Bell, comprobaron que la propagación multicamino podría ser muy beneficiosa en una configuración con múltiples antenas.
1998	Los Laboratorios Bell crearon el primer prototipo de multiplexación espacial, técnica clave para el desarrollo de sistemas de comunicación MIMO.
2001	Iospan Wireless Inc. desarrolló el primer sistema comercial que usaba la tecnología MIMO-OFDMA.
2003	Airgo Networks desarrolló el primer prototipo de chip MIMO, con un DSP para el procesamiento digital de señales.
2006	Compañías como Cisco, Netgear, Belkin o Intel empiezan a fabricar dispositivos para WLANs que aportan una solución MIMO-OFDM denominada 802.11 Pre-N, basada en el futuro estándar IEEE 802.11n. Numerosas compañías desarrollan soluciones MIMO-OFDMA para WiMAX Mobile (802.16e).
2008	Año previsto para la publicación del definitivo estándar IEEE 802.11n, el cual se basará en la tecnología MIMO

**Figura 11. Evolución de la Tecnología MIMO. [17]**

La tecnología MIMO del acrónimo (Múltiples entradas, Múltiples salidas) se basa en un sistema de comunicaciones con múltiples antenas tanto en transmisión como en recepción, este sistema generó en las últimas décadas gran interés a los desarrolladores de tecnología, inicialmente lo propusieron para enlaces punto a punto pero dentro de sus ventajas dio solución tecnológica a sistemas de comunicaciones móviles o celulares. [15]

El uso de múltiples antenas en transmisión y recepción con sistemas MIMO ha mejorado de manera eficiente la explotación del espectro y poder satisfacer la necesidad de alta velocidad de transmisión sin tener la necesidad de incrementar el ancho de banda disponible ni la potencia del transmisor. [16]

La tecnología MIMO explota de manera muy eficiente la diversidad espacial en recepción y transmisión siendo el avance más importante de los sistemas clásicos pero también a través de la codificación espacio temporal puede generar flujos de información por sus diferentes antenas lo que genera mejora en la calidad del enlace o crear diferentes canales que aumentan la eficiencia espectral. [16]

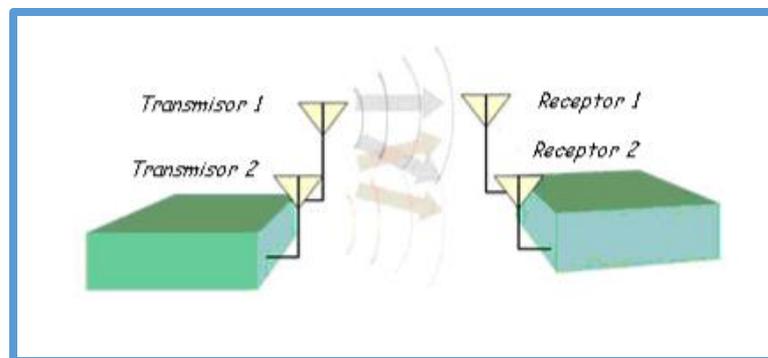


**Figura 12. Diagrama de un sistema MIMO. [17]**

Actualmente los sistemas de comunicación MIMO se encuentran en los estándares de comunicación inalámbrica 802.11n, WiMAX y también puede ser implementado como acceso de canal en HSDPA parte de la norma UMTS. [18]

### 4.3.1 Definición de MIMO

Definido por ingenieros investigadores y académicos, MIMO es una tecnología que especifica el uso de múltiples señales que se transmiten simultáneamente en la misma frecuencia por un solo canal y que se benefician de la propagación multicamino para aumentar la eficiencia del espectro en comunicaciones inalámbricas. Todas las ventajas las consigue a través del uso de diversas antenas, técnicas y complejos algoritmos de tratamiento digital de señales tanto en transmisión y recepción. [17]



**Figura 13. Esquema de transmisión y recepción en sistemas MIMO. [19]**

En los sistemas de comunicaciones inalámbricos tradicionales hacen uso de una sola antena en el transmisor y receptor, al realizarse la transmisión en un medio no guiado está expuesta a varios factores que la podrían modificar como son los obstáculos que ocasiona que la señal se disperse provocando la llegada al destino por múltiples caminos, lo que en este caso sería un problema ocasionando desvanecimiento retardo y pérdida de información [19]. Los sistemas MIMO aprovechan todos los fenómenos físicos para incrementar la tasa de transmisión. [20]

### 4.3.2 Técnicas de MIMO

Antes de comprender el funcionamiento de los sistemas mimos se describe las técnicas utilizadas para trasmisión que son las siguientes:

- Diversidad de antenas
- Multiplexación espacial
- Beamforming

#### ***4.3.2.1 Diversidad de Antenas***

La diversidad de antenas o diversidad espacial se basa en el aumento de la confiabilidad del enlace y tiene la ventaja de no tener que utilizar un ancho de banda adicional, para verificar la confiabilidad del enlace en la capa física se usa la probabilidad de error de bit BER. En resumen la diversidad consiste en crear y usar diferentes canales físicos o espaciales para la transmisión o recepción de datos. [21]

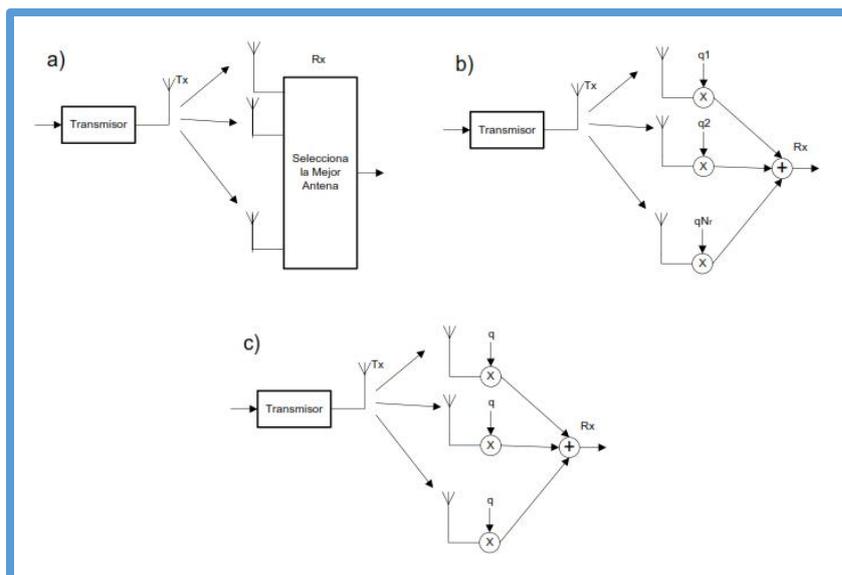
La diversidad puede darse de dos formas dependiendo de qué extremo de la comunicación tenga diversidad, podemos diferenciar diversidad en recepción o diversidad en transmisión. Pueden darse al mismo tiempo o por separado.

##### **➤ Diversidad en Recepción**

La diversidad en recepción se basa en el uso de varias antenas en el receptor para obtener recepciones individuales de la señal transmitida, para esto es necesario la separación adecuada de las múltiples antenas en el receptor. [21]

Dependiendo de cómo se usen las antenas se puede distinguir tres métodos de recepción por diversidad: [17]

- Diversidad por selección
- Diversidad por conmutación
- Diversidad por combinación

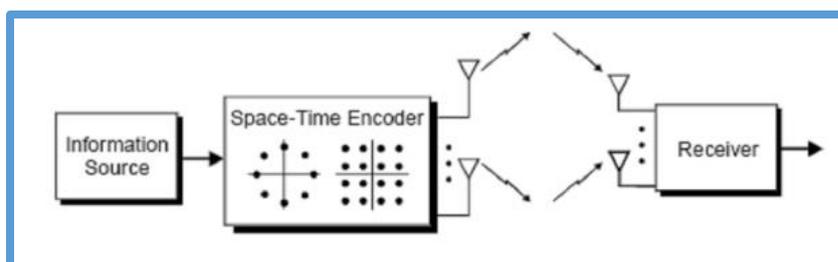


**Figura 14. Diversidad en recepción a.) Selección b.) Combinación c.) Combinación. [21]**

➤ **Diversidad en transmisión**

La diversidad en transmisión se basa en agregar varias antenas en el transmisor las cuales transmitirán la señal individualmente y al mismo tiempo lo que ocasionara interferencias para cual se necesita procesamiento digital de señales en ambos extremos del enlace. [21]

La técnica de diversidad en transmisión que utiliza mimo se denomina codificación espacio tiempo (STC). Esta técnica mejora la factibilidad de la comunicación y se basa en transmitir redundantes copias codificadas de una trama con la finalidad de aumentar la probabilidad de una llegue al receptor y sea posible su decodificación y lectura. [17]



**Figura 15. Diagrama de bloques de un codificador espacio tiempo. [17]**

### 4.3.2.2 Multiplexacion Espacial

La técnica de multiplexado espacial se basa en aumentar la tasa de transmisión. Tiene como objetivo transmitir diferentes flujos de información con igual ancho de banda a través de cada antena, los cuales son posibles distinguir en el receptor debido a la no correlación entre canales por el trayecto multicamino de las señales. [16]

La principal ventaja de esta técnica es maximizar la tasa de transmisión en entornos de no muy buena fiabilidad en relación a señal ruido, su único limitante es el número de antenas en el transmisor como en el receptor, es decir es obligatorio una configuración de antenas mimo para implementar esta técnica. [20]

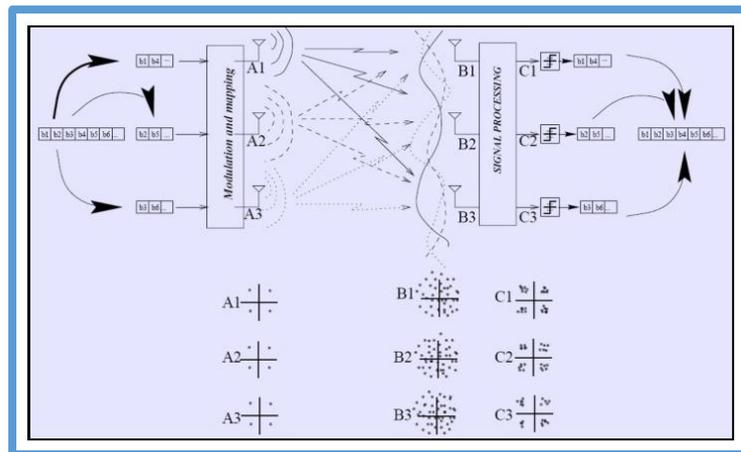
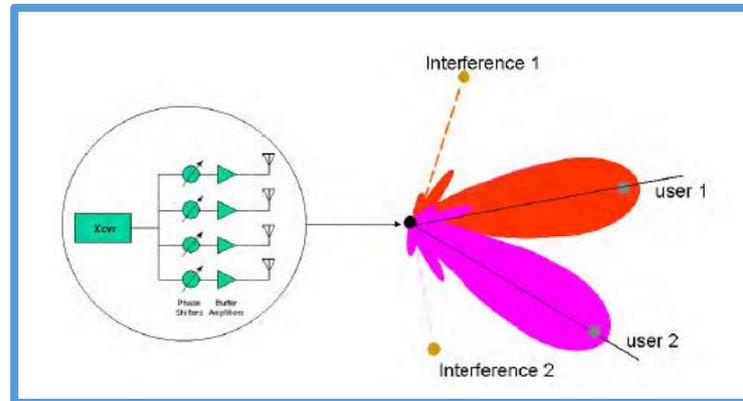


Figura 16. Diagrama de Multiplexacion Espacial. [17]

La distancia física entre las antenas debe de ser considerable en la estación base para así permitir múltiples longitudes de onda y el espacio en el receptor tiene que ser al menos 0,3 veces la longitud de onda para poder distinguir las señales con claridad. [20]

### 4.3.2.3 Beamforming

La conformación de haz es una técnica de procesamiento digital de señales usada para controlar la formación del patrón de radiación de las antenas tanto en transmisión como es recepción. [17]



**Figura 17. Diagrama de Beamforming con cuatro antenas de transmisión.** [22]

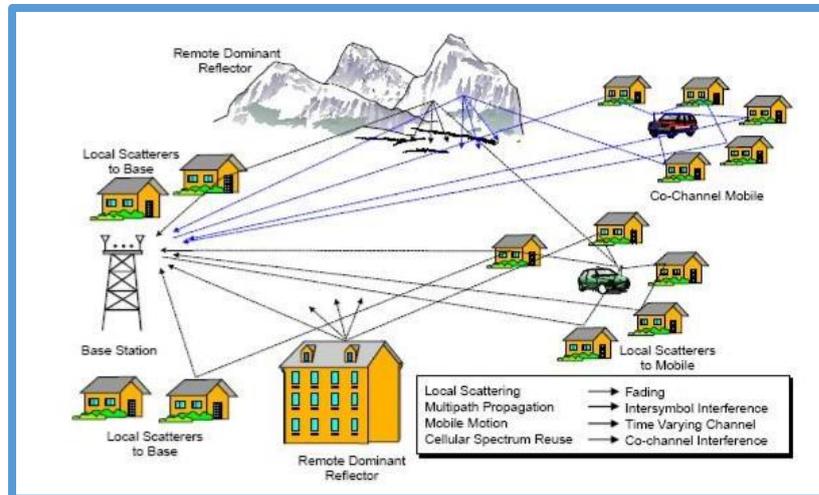
Este se basa en cambiar los parámetros físicos de las antenas para poder dirigir la intensidad de radiación en determinadas direcciones con la finalidad de disminuir la radiación de la antena en direcciones que causen interferencia con las otras antenas. [21]

La conformación de haz puede implementarse tanto en el transmisor como el receptor. En recepción el beamforming se lo utiliza para hacer más sensible la captación de la señal en una dirección determinada, en cambio en transmisión se lo emplea para configurar el patrón de radiación de la antena es decir podremos aumentar la directividad y disminuir la ganancia en otras direcciones. [17]

### 4.3.3 Funcionamiento de MIMO

Un transmisor situado en un lugar específico punto A y un receptor en un punto B siempre habrá un camino primario que será el camino directo entre ambos, pero no todas las señales transmitidas siguen el camino directo, si no que debido a todos los obstáculos presentes toman diferentes caminos hasta llegar al receptor, como

anteriormente se explicó esto se denomina propagación multitrayecto la cual es la principal ventaja de la tecnología MIMO y base de su funcionamiento. [17]



**Figura 18. Distorsiones presentes en el canal de comunicaciones. [17]**

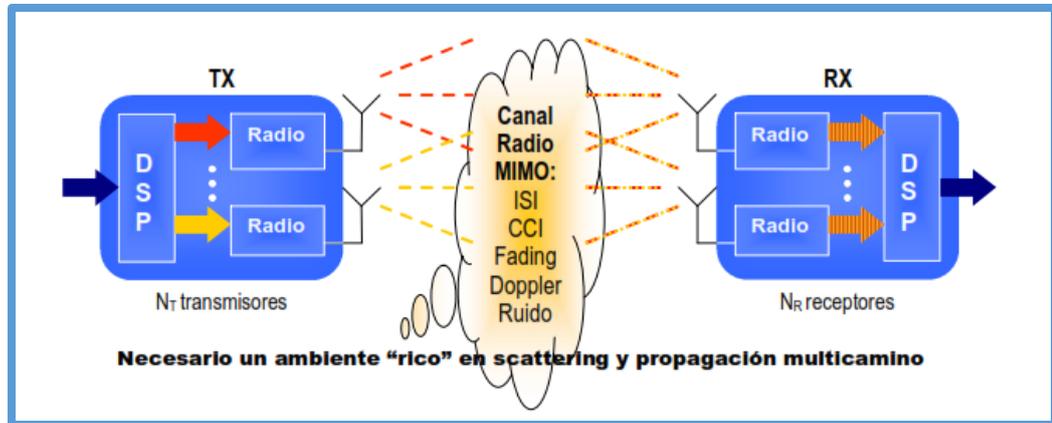
El funcionamiento de la tecnología MIMO se basa de la siguiente forma:

- Transmisor con  $N_t$  antenas transmisoras espacialmente distribuidas.
- El transmisor presentara un procesador digital de señales (DSP).
- El DSP codificara un flujo de información en subflujos.
- Cada subflujo se lo enviara de manera independiente por cada antena al mismo espacio de tiempo y a la misma frecuencia.

En la propagación multicamino cada ruta será tratada como un canal diferente creando una especie de mazo de cables en donde se transmite las señales, cada cable virtual permitirá la transmisión de más datos lo que aumentara la tasa de transmisión es decir mientras más número de subflujos se tenga, la tasa máxima por canal crecerá linealmente en el mismo canal.

En una explicación de los canales virtuales, como sabemos en el medio inalámbrico no son cables, lo que hace que los canales virtuales se mesclen entre sí, resultando una combinación de todas las señales captadas por las antenas del receptor por lo

que el DSP del receptor, mediante complejos algoritmos de procesado de señales, separara cada uno de ellos, los ordenara y los combinara, recuperando la señal original con los datos transmitidos originalmente. [17][23]



**Figura 19. Esquema general de un sistema MIMO. [17]**

#### 4.3.4 Tipos de MIMO

Se puede definir principalmente dos tipos: SU-MIMO (simple usuario MIMO) y MU-MIMO (múltiples usuarios MIMO).

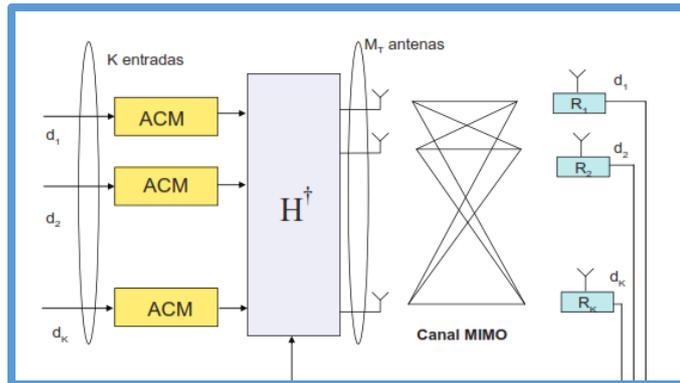
##### 4.3.4.1 SU-MIMO

Este tipo de MIMO para definirlo de forma más exacta sería MIMO de un solo usuario o MIMO de enlace punto a punto. Sus principales características son las descritas a continuación. [17]

- Mejoras en la eficiencia espectral.
- Fiabilidad del enlace por la técnica de Multiplexación espacial.
- SU-MIMO no explota la diversidad de usuarios y el acceso múltiple.
- Las múltiples antenas son aprovechadas para crear una transmisión multidimensional punto a punto.
- SU-MIMO no está diseñado para trabajar con varios usuarios al mismo tiempo.
- Principales técnicas desarrolladas son BLAST, PARC y SPARC.

#### 4.3.4.2 MU-MIMO

MU-MIMO representa un conjunto de técnicas y algoritmos avanzados que aparte de aprovechar las ventajas del uso de múltiples antenas explota la multicapacidad de usuarios. A continuación un diagrama de MU-MIMO.



**Figura 20. Estructura de MU-MIMO. [24]**

Las características principales de MU-MIMO son: [24] [17]

- Se basa en el reparto espacial del canal entre múltiples usuarios (acceso multiple).
- Crea transmisiones multidimensionales punto a multipunto e incluso multipunto a multipunto.
- Mejor eficiencia en la suma de velocidades de transmisión por unidad de banda en el conjunto de la celda.
- Utiliza la técnica SDMA método de multiple acceso que permite a una estación transmitir o recibir señales hacia o desde múltiples usuarios, simultáneamente y en la misma banda de frecuencia.
- Se clasifica en MU-MIMO punto a multipunto y MU-MIMO multipunto a multipunto.

## **5. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **5.1 LIMITACIONES DE LAS ANTENAS PARA REDES WLAN**

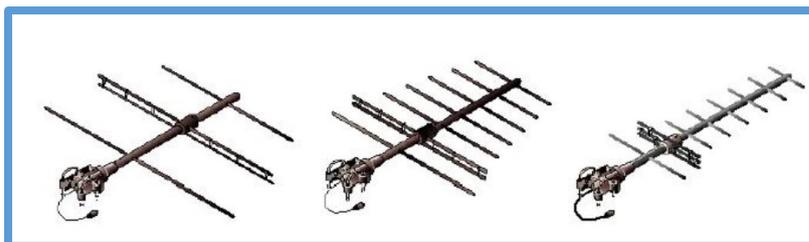
Existen diferencias entre los distintos tipos de antenas que se utilizan para WLAN en donde se pueden identificar limitaciones de cada una, lo cual es necesario saberlas, para hacer una elección óptima al momento de implementar una antena en una aplicación específica, a continuación se explicaran los principios de funcionamiento de tres tipos de antenas para entender sus limitaciones.

En la actualidad las antenas se las elige dependiendo del tipo de transmisión o aplicación, pero también hay varios factores, que hoy en día se deben tener en cuenta para aplicarlas a redes WLAN tanto en Outdoor como en Indoor.

Los factores tradicionales que se tienen en cuenta en una antena son su ganancia, patrón de radiación y directividad pero estas características no deberían ser suficientes, también debería considerarse factores como mimetización en el diseño e integridad con el dispositivo transmisor, miniaturización y componentes livianos, sencillez de adaptación para superficies planas e irregulares, facilidad de producción en masa y versatilidad en términos de patrón de radiación, impedancia y frecuencia de resonancia.

### 5.1.1 Antenas yagi

La antena Yagi Uda fue desarrollada por Shintaro Uda y Hidetsugu Yagi en 1926, ambos de la universidad de Imperial de Tohoku, Sendai, Japón. Su investigación se basó en quitar la tierra en las antenas convencionales y planteo el uso de un dipolo simple combinado con elementos paracitos de diferente longitud y distantes una medida específica para modelar el patrón de radiación mejorando la ganancia y la directividad.



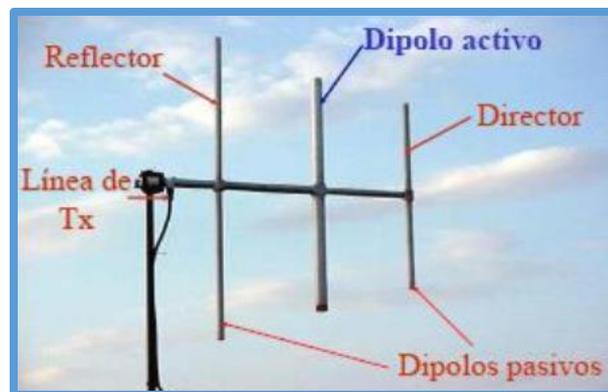
**Figura 21. Antenas Yagi-Uda. [26]**

La invención de la antena Yagi en un principio fue para la guerra como un arma de alta concentración radioactiva por su directividad. Yagi publicó la investigación en 1928 en idioma inglés siendo aceptada en Europa y Norteamérica para su producción comercial, de los sistemas de telecomunicaciones. [25]

Se puede notar en la figura 21. Que la antena Yagi es un arreglo lineal de elementos los cuales producen un haz axial endfire. [26]

Mediante una antena dipolo de media onda se puede lograr antenas que reciban o radien ondas en un haz muy estrecho por efecto permite radiar en una dirección en el espacio toda la energía, logrando que la intensidad de campo sea mayor que la radiada por una simple antena de la misma potencia. [25]

Las antenas Yagi están compuestas por elementos constituidos de filamentos de alambre denominados dipolos, estos elementos, uno está activo y los demás se denominan elementos parásitos que se clasifican en reflectores y directores. [27]



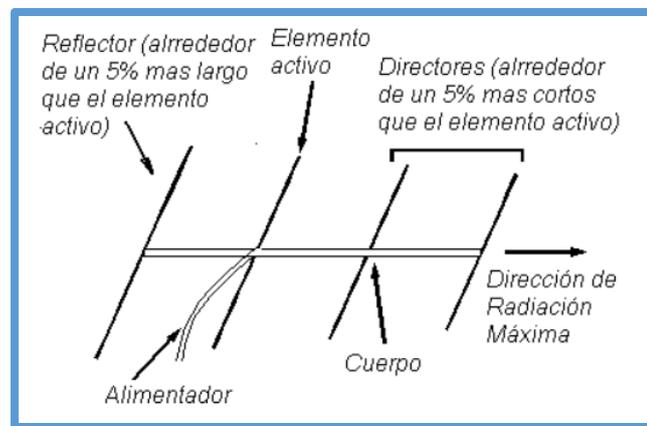
**Figura 22. Elementos de una antena Yagi. [26]**

El elemento activo o excitador se encuentra conectado a la línea de transmisión y es el cual induce energía a los elementos parásitos.

Los elementos parásitos no se conectan a la línea de transmisión y reciben la energía por inducción mutua de parte del elemento activo, los elementos parásitos se clasifican en reflectores y directores.

Los reflectores son elementos parásitos de mayor longitud al elemento activo y este reduce la intensidad de radiación que está en su dirección e incrementa la que está en la dirección opuesta.

Los directores también son elementos parásitos de una longitud menor a su elemento de excitación, este elemento incrementa la intensidad de radiación en su dirección y la reduce en la dirección opuesta. [25][26][27]



**Figura 23. Distribución de elementos activos y parásitos en una antena Yagi.**  
[27]

La línea de transmisión alimenta al dipolo excitado en el cual se produce una corriente electromagnética y actúa sobre los directores y reflectores de la antena e induce una corriente en ellos. Los elementos parásitos también inducen una corriente hacia los restantes dipolos.

Las corrientes inducidas crean una interacción entre todos los dipolos determinando una corriente resultante en cada dipolo parásito e influye en la corriente total de la antena por ende también en la impedancia de entrada del dipolo excitado.

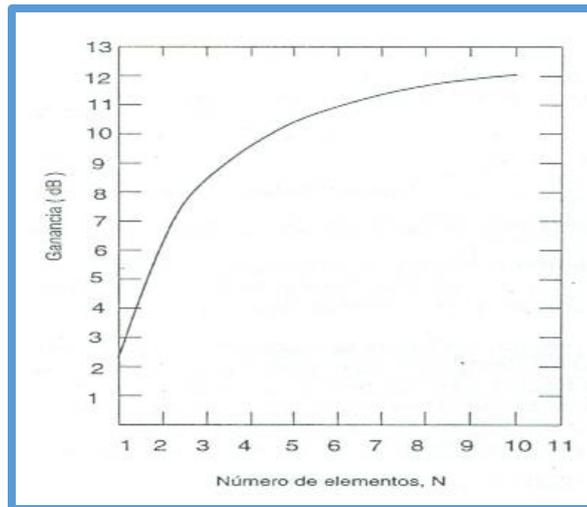
Si se diseña de manera conveniente las longitudes y la separación de los dipolos estos formaran un arreglo de tal manera que sus corrientes individuales serán de

igual magnitud y con el mismo desplazamiento de fase aumentando el campo del elemento excitado en dirección de los directores. [26]

Para que la antena Yagi consiga un haz endfire (radiación longitudinal) los elementos parásitos en dirección de la radiación del elemento activo (directores) debe ser de menor longitud al del elemento excitado, normalmente el elemento activo esta resonando a una longitud de  $\lambda/2$  ( $0.5 \lambda$ ) en cambio las longitudes de los directores serán un 5% menor ( $0.45\lambda$ ). Los directores no necesariamente deben de tener la misma longitud y grosor por tanto la separación de los directores tampoco será la misma, esta separación estará entre  $0.3 - 0.4\lambda$  ya que experimentalmente se ha demostrado que para una antena Yagi de longitud total de  $6 \lambda$  su ganancia es independiente de la separación y grosor de los directores hasta unos  $0.32 \lambda$ .

La longitud del reflector es mayor al menos el 5% que del elemento excitado y la separación del elemento excitado es menor que la del director, se ha definido que una distancia óptima es  $0.25 \lambda$ . [28]

Al aumentar el número de directores dentro del arreglo de la antena Yagi producirá un aumento en las directividad de la antena pero hasta cierto punto, es decir ya cuando existen directores muy lejanos al elemento excitado las magnitudes de las corrientes inducidas también se reducen, se podría seguir aumentando los directores pero ha cierto número el aumento ya no será sustancial. [28]



**Figura 24. Grafica de la ganancia de una Yagi en función de su número de elementos. [27]**

Las características que son de importancia al momento de diseñar o adquirir una antena Yagi son:

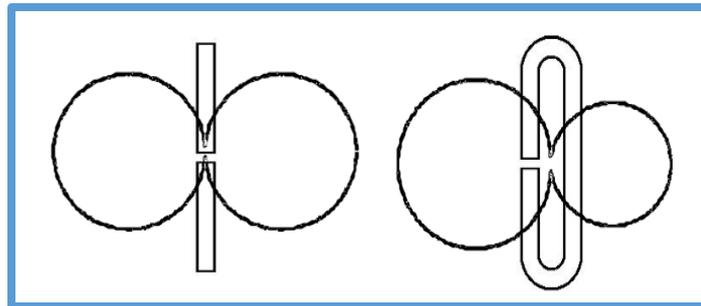
- Ganancia
- Impedancia de entrada
- Ancho de banda
- Relación de adelante atrás (F/B)
- Relación lóbulo principal a secundario

Para determinar características favorables de una antena Yagi se debe de tener consideración en las dimensiones de los directores y reflectores, estas dimensiones pueden ser analizadas de forma experimental o computacional. Mediante análisis experimental se ha definido que este tipo de antena presenta una baja impedancia de entrada, por ende un ancho de banda relativamente bajo. Pero es posible mejorar estos parámetros empeorando otros.

Al momento de diseñar una antena Yagi se ha analizado que la longitud y grosor del reflector y del elemento activo no afecta a la ganancia de la antena pero si a la

impedancia de entrada es decir dicho parámetro puede ser utilizado para ajustar dichos parámetros sin afectar de forma significativa la intensidad de radiación. [28]

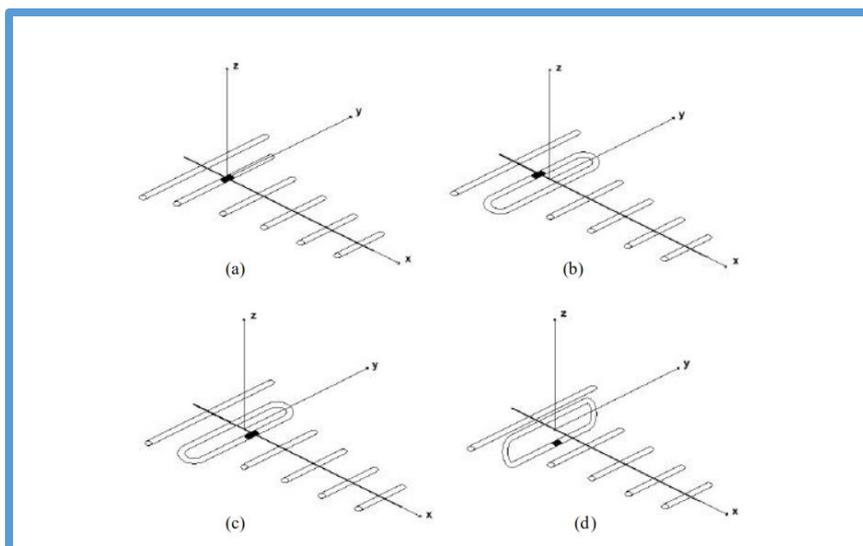
En las explicaciones anteriores se habló de un dipolo excitado recto pero existe la variación del dipolo doblado para aumentar ciertas características de la antena Yagi en la siguiente figura se muestra la diferencia física y de radiación de los dipolos rectos y doblado.



**Figura 25. Patrones de radiación en el plano E para un dipolo sencillo y un dipolo doblado. [29]**

Existen diferentes tipos de configuraciones de las antenas Yagi con dipolo doblado en las que resaltan las siguientes.

- a) Un dipolo recto sencillo
- b) Un dipolo doblado coplanar, alimentado en el lado más cerca del parasito reflector.
- c) Un dipolo doblado coplanar, alimentado en el lado más cerca de los parásitos directores.
- d) Un dipolo doblado transversal al plano que contiene todos los elementos parásitos.

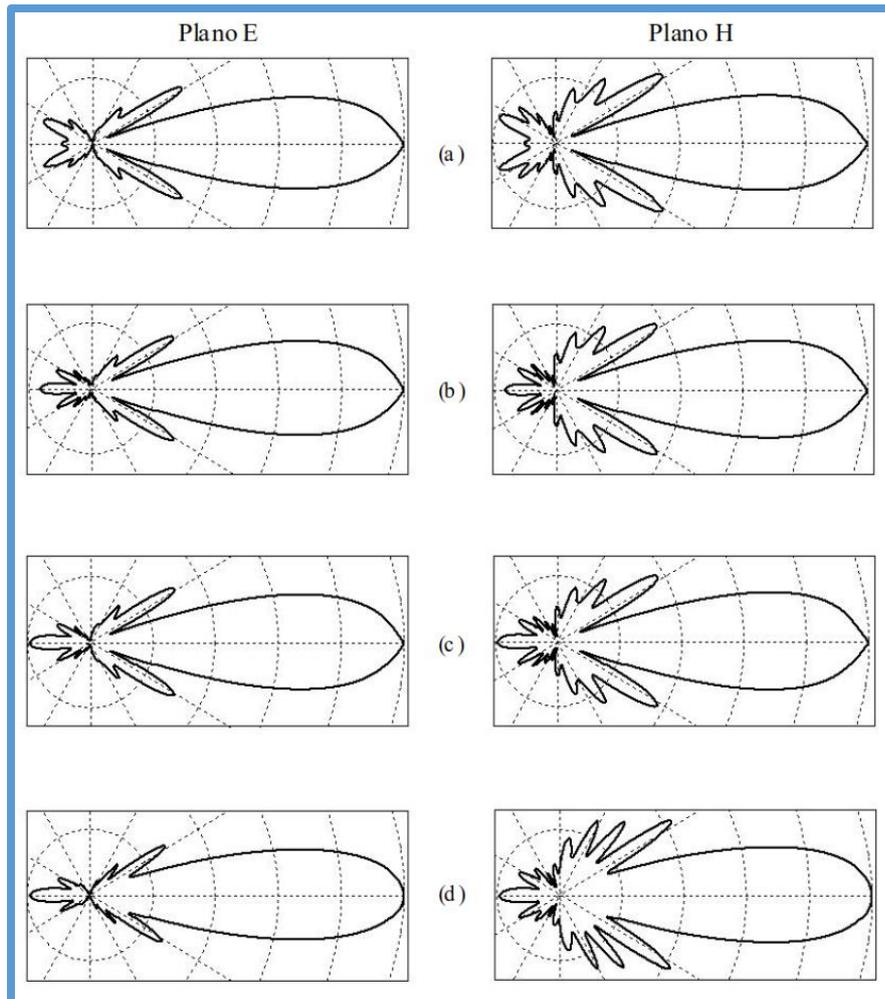


**Figura 26. Configuraciones de arreglos Yagi. [29]**

En cuestión de impedancia el uso de un dipolo doblado en el arreglo incrementa la impedancia de entrada con una proporcionalidad cercana a cuatro es decir la impedancia de la antena no permanece constante lo que le permite tener un gran ancho de banda, alta directividad y ganancia.

El gran ancho de banda de estos arreglos les permite recibir varios canales de 6 MHz con un nivel aceptable de VSWR menor o igual a 2.

En la siguiente figura se presentan los patrones de radiación para las diferentes configuraciones de antenas Yagi destacando que todos son directivos lo que la diferencia es su simetría y nivel de lóbulos secundarios.



**Figura 27. Patrones de radiación normalizados para arreglos Yagi. [29]**

- a) Un dipolo recto sencillo
- b) Un dipolo doblado coplanar, alimentado en el lado más cerca del parásito reflector.
- c) Un dipolo doblado coplanar, alimentado en el lado más cerca de los parásitos directores.
- d) Un dipolo doblado transversal al plano que contiene todos los elementos parásitos.

Las principales aplicaciones de antenas son: [25] [26] [27] [28] [29]

- Extensamente utilizadas en los receptores de TV.

- Comunicaciones Móviles Terrestres tanto en la banda de VHF (30-300 MHz) y UHF (300-3000 MHz).
- Radiodifusión en la banda de FM (88-108 MHz).
- Enlaces de Radio con visibilidad directa y en enlaces HF (3-30MHz).

### 5.1.2 Data sheet Antena Yagi

En esta sección se analizarán las antenas Yagi existentes en el mercado, para esto se presentan los datasheet donde constan las características de cada antena.

#### ➤ Antena Yagi LANPRO LP-YAGI2415N

Las antenas Yagi constituyen una excelente opción cuando se requiere de una ganancia entre media y grande con características robustas. Las antenas de esta marca son estables, livianas, de pequeño tamaño y de excelentes prestaciones. Han sido fabricadas con los mejores materiales disponibles y con el objetivo de prestar un servicio superior y las condiciones ambientales más extremas.

Su radomo de plástico ABS de trabajo pesado protege las partes internas de las condiciones extremas climáticas que van desde la existente campos helados hasta las existentes en las playas del Caribe con su calor y humedad, sin ningún mal funcionamiento reportado.



**Figura 28. Antena LanPro LP-YAGI2415N. [30]**

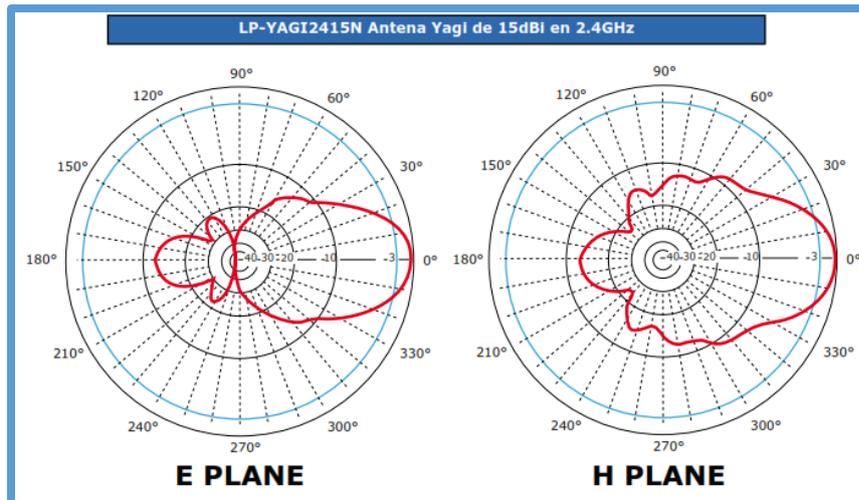
Estos sistemas de antenas pueden utilizarse en aplicaciones de alto desempeño en la banda de los 2.4 GHz y son ideales para aplicaciones tipo CPE debido a su bajo costo y pueden también usarse para aplicaciones temporales y portátiles.

Los herrajes de montaje sobre poste son fabricados en acero inoxidable, lo cual dice mucho de la calidad que LanPro diseña en sus productos.

Rango de Frecuencias (MHz)	2400-2500
Ancho de Banda (MHz)	83.5
Ganancia (dBi)	15
E: Ancho Vertical del Haz (°)	28
H: Ancho horizontal del haz(°)	30
Relación Frente/Atrás(dB)	>=18
V.S.W.R	<1.5
Impedancia Nominal ( $\Omega$ )	50
Polarización	Vertical
Potencia Máxima (Watt)	100
Conector	N Female
Longitud(mm)	460
Peso (Kg)	1.1
Velocidad máxima del viento(Km/h)	210
Diámetro del Mástil o poste(mm)	30-55
Temperatura de Operación(°C)	-40 to +60

**Figura 29. Especificaciones técnicas de la antena Yagi LanPro. [30]**

Se puede notar en la tabla de especificaciones técnicas que el ancho de haz es muy estrecho por lo que son muy directivas por ende su diagrama de radiación es de la siguiente forma.

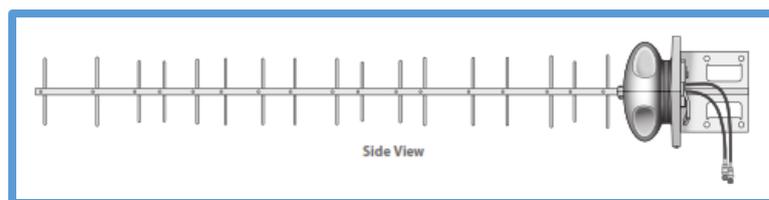


**Figura 30. Diagramas de Radiación de la Antena LanPro. [30]**

El datasheet completo está incluido en la sección de anexos.

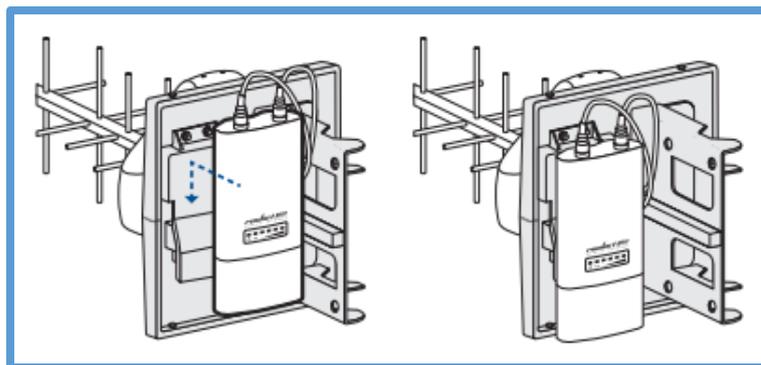
➤ **Antena airMax 900MHz YAGI**

El AirMax 900 MHz Yagi es una red de antenas de alta ganancia diseñado para integrarse perfectamente con el dispositivo de radio M900 (se vende por separado). Cuenta con un increíble rango de (+ 20 km) y la velocidad de avance (TCP 90 + Mbps reales / IP).



**Figura 31. Forma física de la antena Yagi airMax. [31]**

El dispositivo M900 combina el cerebro en una unidad robusta; que se puede combinar con el AirMax 900 MHz YAGI (AMY-9M16) o AirMax 900 MHz. Esta versatilidad da a los ingenieros flexibilidad y conveniencia de crear potentes 2x2 MIMO punto a punto de transición, o soluciones de estación base MIMO punto multipunto.



**Figura 32. Montaje de la antena airMax con el dispositivo M900 para formar arreglos MIMO 2x2. [31]**

Este datasheet no presenta los diagramas de radiación pero se puede tener una idea por el ancho de haz tanto en polarización vertical u horizontal los cuales están en valores comprendidos entre 29 a 34 grados los que significa que es muy directiva para enlaces punto a punto.

airMAX 900 MHz YAGI Antenna Characteristics	
AMY-9M16	
Frequency Range	902 - 928 MHz
Gain	16 dBi, Both Polarizations
HPOL Beamwidth	29 to 34°
VPOL Beamwidth	29 to 34°
F/B Ratio	20 dB
Max VSWR	< 1.5:1 Over Band
Dimensions	1365 x 215 x 218 mm
Weight	2.5 kg
Wind Survivability	120 mph
Wind Loading	35 ft-lbs @ 100 mph
Polarization	Dual Linear
Cross-pol Isolation	20 dB
ETSI Specification	EN 302 326 DN2
Mounting	M8 U-Bolt Pole Mounting Kit Included

**Figura 33. Especificaciones técnicas de la antena Yagi airMax. [31]**

El datasheet completo está incluido en la sección de anexos.

### 5.1.3 Limitaciones Antenas Yagi

Las antenas Yagi no son tan direccionales como las antenas parabólicas, pero son más directivas que las antenas panel.

Como se puede ver en la sección anterior las antenas Yagi son excelentes para aplicaciones de enlaces punto a punto por su patrón de radiación (28 a 34 grados de ancho de haz) entre sectorial y directivo, es decir se puede establecer enlaces en una distancia considerable (20 Km) sin tener que apuntar con exactitud su patrón de radiación.

Las antenas yagi poseen un gran ancho de banda por lo que son muy utilizadas para recepción de tv pero para esto se debe cambiar el dipolo sencillo a un dipolo doblado es decir se aumenta la complicación del diseño físico y por ende aumento de tamaño.

A nivel de implementación las antenas Yagi necesitan soportes metálicos para ajustarlas a tubos ya que a estas antenas no es factible instalarlas en cualquier tipo de superficie, a nivel de aplicaciones de redes WLAN son muy utilizadas en los equipos CPE en posiciones Outdoor es decir enlazado a la celda del ISP ya que su patrón de radiación y tamaño no permite darle aplicación de acceso de usuarios dentro de oficinas.

Las antenas Yagi no poseen la característica de integración con el dispositivo transmisor lo más común como se observa en los datasheet expuestos es que solo se ofrece la antena la cual se deberá conectar al transmisor a través de un pigtail ocasionando pérdidas por acople de impedancias.

En cuestión de mimetización y miniaturización tampoco es una ventaja de las antenas Yagi ya que si se quiere aumentar la ganancia de la antena se tendrá que aumentar el número de elementos parásitos y por ende aumentara su tamaño como lo indica la gráfica de la figura 24, es decir siempre serán visibles al ojo humano.

El datasheet de la antena AirMax 900 MHz se observan que son compatibles con la tecnología MIMO a través del dispositivo M900, con el cual se pueden formar arreglos de 2x2 para aplicaciones de punto multipunto, pero como se mencionó anteriormente el dispositivo M900 se lo debe adquirir por separado, se lo debe instalar lo más cerca posible para reducir las pérdidas por acople y requiere un ajuste e instalación a la base más complicada.

#### 5.1.4 Antena Parabólica (grilla)

El origen de la antena parabólica data en los años de 1888 en los experimentos de Heinrich Hertz, que demostraron la existencia de las ondas electromagnéticas que había sido predichas por James Maxwell.

Para obtener la máxima directividad en una antena se le debe implementar un reflector su forma generalmente es parabólica con el alimentador ubicado en el foco y dirigida hacia el reflector.

Las antenas parabólicas estándares se construyen comúnmente de aluminio, el cual es planchado alrededor de un spinning parabolas shaped.

Las dimensiones del reflector de una antena parabólica no dependen de la frecuencia de trabajo pero a más alta frecuencia más perfección de la superficie del reflector es requerido.

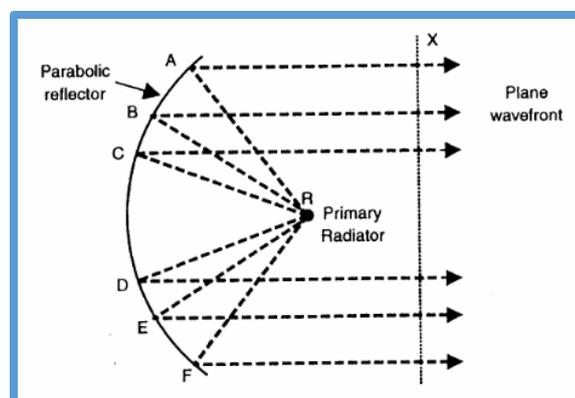
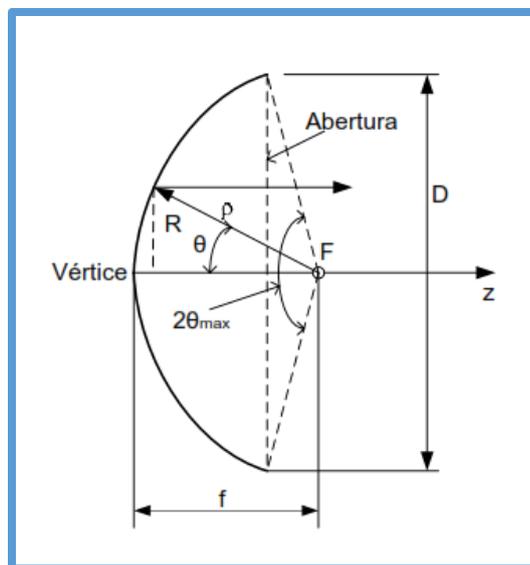


Figura 34. Principio básico de una antena parabólica. [32]

El alimentador es una antena lineal o un alineamiento de estas colocada en línea focal y la reflexión en la superficie parabólica transforma el frente de onda de cilíndrico en plano.

La base de funcionamiento de las antenas parabólicas son las propiedades ópticas de las ondas electromagnéticas ya que las propiedades geométricas de la parábola son tales que las ondas emitidas por la fuente de energía en el foco se reflejan por la parábola en un haz de rayos paralelos al eje de la parábola, de modo que se tenga la misma longitud del trayecto del foco al reflector parabólico y, después, hasta la superficie de la abertura que pasa por los bordes de la parábola, es la misma para cualquier ángulo.

Por ende el rayo emitido en la abertura de la antena tiene una superficie equifase y el haz radiado es cilíndrico, en los bordes del reflector parte de la energía se dispersa ya que a nivel de práctico ningún sistema es ideal.



**Figura 35. Geometría de una antena parabólica. [33]**

En cuestión de diseño para conseguir la máxima eficiencia de una antena parabólica se necesita un control de la amplitud, fase y polarización del campo incidente sobre el reflector lo que acusa la importancia sobre el excitador primario o alimentador

que no es más que una antena direccional orientada con la máxima radiación en dirección al vértice del paraboloide.

El vértice del paraboloide debe ser pequeño y de tal forma que el rayo incidente produzca un frente de onda esférico para que la amplitud de haz radiado por el alimentador debe abarcar un ángulo amplio para incidir sobre toda el área del reflector. [33]

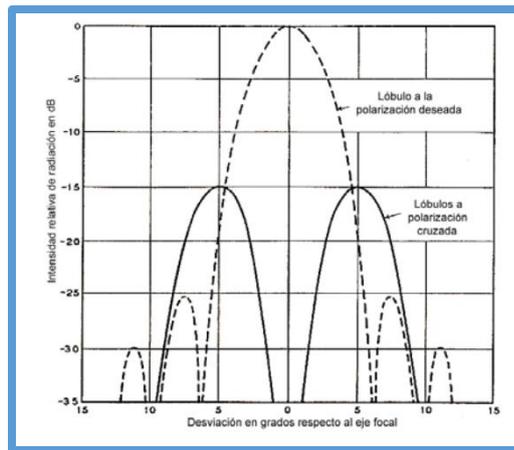
El patrón de radiación de una antena parabólica se ve alterado cuando el frente de fase no es esférico o no se corrige esto ocasionara una reducción en la ganancia y el ensanchamiento del lóbulo principal teniendo bajos niveles.

En el diseño un alimentador dado debe tener una distancia óptima focal para el cual se alcance la eficiencia máxima. Para obtener la ganancia óptima el alimentador debe estar situado precisamente en el foco, si se mueve a lo largo del eje focal la ganancia oscila alrededor de un valor promedio ya que el campo radiado directamente por el alimentador se suma en las diversas componentes del campo reflejado por el paraboloide.

Las ecuaciones matemáticas suponen una eficiencia de cien porciento lo que no ocurre en la práctica ya que para hacer un uso efectivo del área del reflector parabólico la energía debe estar distribuida uniformemente sobre la superficie pero hay distintos factores que impiden esto de alguna forma como son:

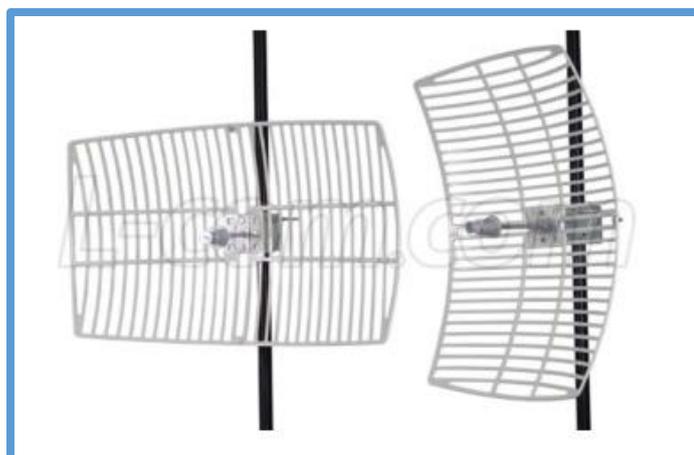
- Amplitud en la abertura y el factor de la superficie.
- Eficiencia del alimentador.
- Corrientes eléctricas presentes en la parte posterior del reflector.
- Aparición de polarización cruzada.
- Diferencia de fase en la distribución de corrientes superficiales.
- Desborde de la energía radiada por la difracción en el reflector.

Por ultimo en cuestión de polarización está directamente relacionado con el patrón de radiación ya que las características de radiación del alimentador debe ser tal que todas las ondas estén polarizadas en la misma dirección después de ser reflejadas por el paraboloide. Todas las componentes del campo que se radien con polarización perpendicular a la deseada se pierden y contribuyen a la radiación por lóbulos secundarios. [33]



**Figura 36. Lóbulos secundarios debido a polarización cruzada. [33]**

Las antenas grilla se las utiliza en frecuencias de microondas menores cercanas a 2.5 GHz, una de sus principales ventajas es que tienen menos carga de viento sobre la torre.



**Figura 37. Antenas parabólicas Grillas. [34]**

A nivel técnico tienen los mismos parámetros de la antena plato sólido y pueden utilizar el mismo terminal alimentador o conector.

Con respecto a la elección de la longitud de onda debe ser de tal forma que la abertura entre las rejillas no afecte el comportamiento eléctrico de la antena.

Las antenas grillas tienen menos razón F/B debido a la difracción de los elementos de rejilla. La principal limitación de las antenas rejillas es que no soportan más de una polarización es decir la rejilla reflectora polariza la señal en la dirección que la varilla está posicionada. [32]

En conclusión con reflector parabólico se utilizan extensamente en sistemas de comunicaciones en las bandas de UHF a partir de unos 800MHz y en las de SHF y EHF, su principal ventaja es su elevada direccionalidad.

### **5.1.5 Data sheet Antena grilla**

En esta sección se analizarán las antenas Grillas existentes en el mercado, para esto se presentan los datasheet donde constan las características de cada antena.

#### **➤ Antena Grilla Tp-Link TL-ANT2424B**

La antena direccional TL-ANT2424B 24dBi es ideal para uso al aire libre al unirse a sus acceso Puntos / routers inalámbricos. Podría ser utilizado para la conexión punto a punto de larga distancia, proporcionando a sus enlaces inalámbricos estables. Es muy fácil de usar, sin instalación o configuración del software necesario.



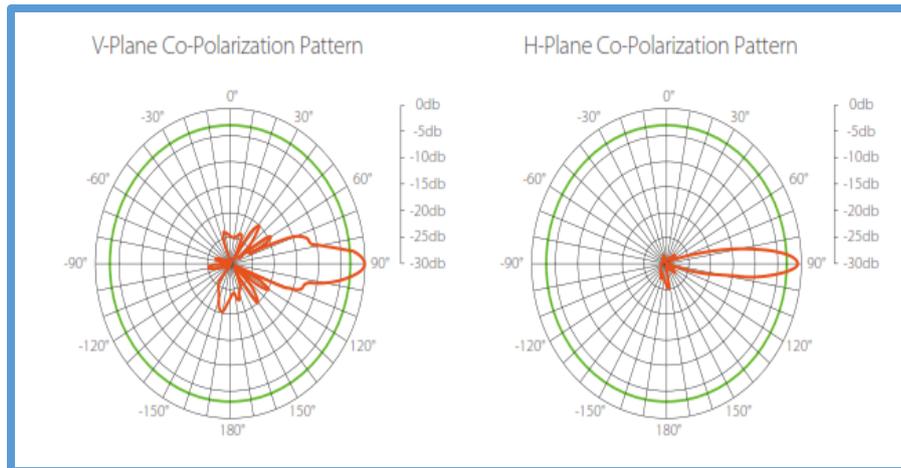
**Figura 38. Diseño físico de la antena Grilla TL-ANT2424B. [35]**

Diseño resistente a la intemperie, adecuado para todas las condiciones climáticas.  
 Conector N Hembra, aplicable en la mayoría de las soluciones al aire libre.

Frequency Range	24~2.4835GHz
Gain (Exclude Cable Loss)	24dBi
VSWR	≤1.5
HPBW/H(°)	10
HPBW/V(°)	14
F/B Ratio	>30dB
Impedance	50 Ohms
Admitted Power	100W
Interfaces	N Female (Jack)
Polarization	Vertical or Horizontal
Mounting Mast Diameter	Ø30~Ø50 mm
Mounting	Wall Mount / Pole Mount
Survival Wind Speed	216Km/hr (134Miles/hr)
Standards	RoHS, WEEE
Operating Temp.	-40°C~60°C(-40°F~140°F)
Storage Temp.	-40°C~60°C(-40°F~140°F)

**Figura 39. Especificaciones técnicas de la antena Grilla TL-ANT2424B. [35]**

Podemos notar la directividad de la antena con su patrón de radiación tanto en plano E y H.

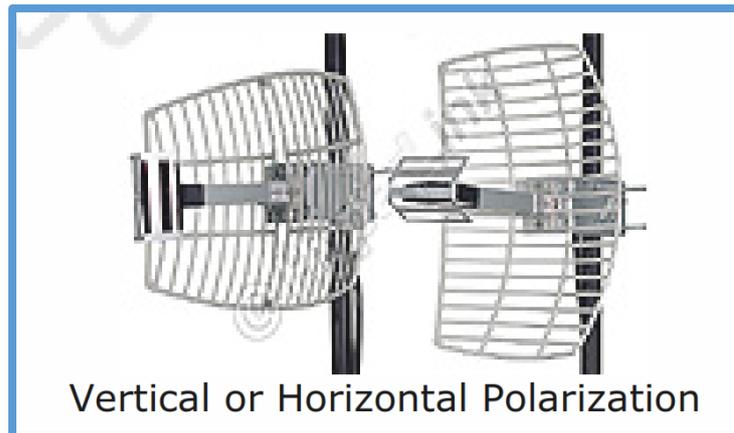


**Figura 40. Patrón de radiación de la antena Grilla TL-ANT2424B. [35]**

➤ **Antena 2.4 GHz 15 dBi Die Cast Mini-Reflector Grid Wireless LAN HG2415G**

Esta antena proporciona 15 dBi de ganancia con un ancho de haz horizontal de 16 grados para aplicaciones direccionales. Su diseño compacto hace que sea casi invisible en la mayoría de las instalaciones, y se puede instalar ya sea para la polarización vertical u horizontal. Es ideal para aplicaciones de banda ISM de 2,4 GHz, tales como sistemas de LAN IEEE 802.11b, 802.11g y 802.11n inalámbrica.

La construcción de esta antena cuenta con una fundición de rejilla reflector de aluminio a prueba de óxido para mayor resistencia y peso ligero. Esta antena de 2 piezas rejilla reflectora es fácil de montar y reduce significativamente los costos de envío. La superficie de la rejilla es polvo UV recubierto para mayor durabilidad y estética. El diseño de la rejilla de marco abierto minimiza la carga del viento.



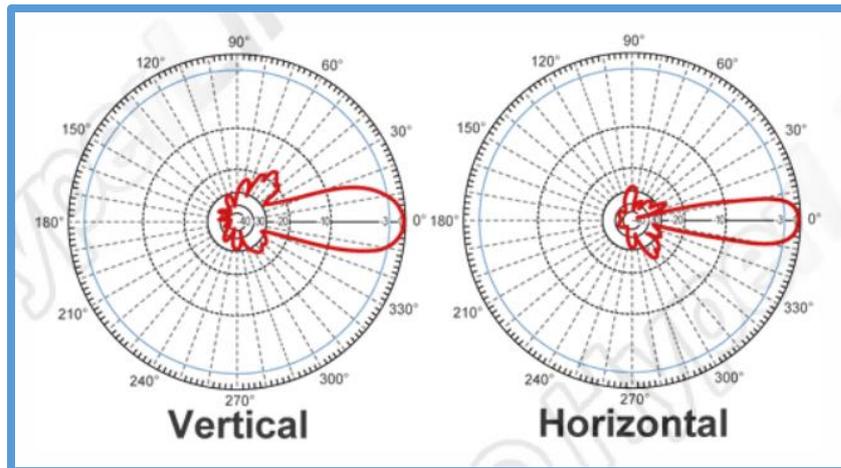
**Figura 41. Diseño físico de la antena grilla Hyperlink HG2415G. [36]**

La antena HG2415G se suministra con una inclinación de 60 grados y el mástil de montaje giratorio. Esto permite la instalación en varios grados de inclinación para facilitar la alineación. Se puede ajustar hacia arriba o hacia abajo de 0 ° a 60 °.

<b>Frequency</b>	2400-2500 MHz
<b>Gain</b>	15 dBi
<b>Horizontal Beam Width</b>	16°
<b>Vertical Beam Width</b>	21°
<b>Polarization</b>	Horizontal or Vertical
<b>Front to Back Ratio</b>	20 dB
<b>Impedance</b>	50 Ohm
<b>Max. Input Power</b>	100 Watts
<b>VSWR</b>	< 1.5:1 avg.
<b>Lightning Protection</b>	DC Short
<b>Weight</b>	3 lbs. (1.4 kg)
<b>Grid Dimensions</b>	11.8" (300 mm) x 15.7" (400 mm)
<b>Mounting</b>	1.25 - 2 in. (31.8 - 50.8 mm) dia mast max.
<b>Elevation Angle</b>	0 to +15°
<b>Operating Temperature</b>	-40° C to to 85° C (-40° F to 185° F)
<b>RoHS Compliant</b>	Yes

**Figura 42. Especificaciones técnicas de la antena grilla Hyperlink HG2415G. [36]**

Esta antena tiene un ancho de haz en polarización vertical de 21 grados y de 16 grados en polarización horizontal.



**Figura 43. Patrón de radiación de la antena grilla Hyperlink HG2415G. [36]**

El datasheet completo está incluido en la sección de anexos.

### **5.1.6 Limitaciones Antena Parabólica (grilla)**

Las antenas parabólicas grilla son más directivas que las antenas parche y Yagi ya que usan características físicas así como antenas de elementos múltiples para alcanzar muy alta ganancia y direccionalidad.

Las antenas grillas son las más óptimas en aplicaciones de enlaces punto a punto a largas distancias ya que su ancho de haz va desde 10 a 21 grados dependiendo de su ganancia (si aumenta la ganancia menor es su ancho de haz).

La limitación de tener un ancho de haz muy angosto es de poseer poca cobertura lo que significa que al momento de implementar un enlace punto a punto las antenas deben estar perfectamente direccionadas para lograr la comunicación.

A nivel de diseño físico son de mayor tamaño y peso en comparación con las antenas Yagi, por lo que las características de mimetización y miniaturización serían una desventaja ya que para mejorar las características se tendría que aumentar tamaño.

Estas antenas no vienen integradas al dispositivo transmisor por lo que también se genera pérdidas por acople mediante pigtail.

Su instalación no puede efectuarse en cualquier superficie se debe hacerlo en lugares adecuados y óptimos como lo son tubos, por otra parte también es de tediosa instalación ya que las antenas grilla vienen en dos partes las cuales deben armarse y sujetarse con implementos mecánicos.

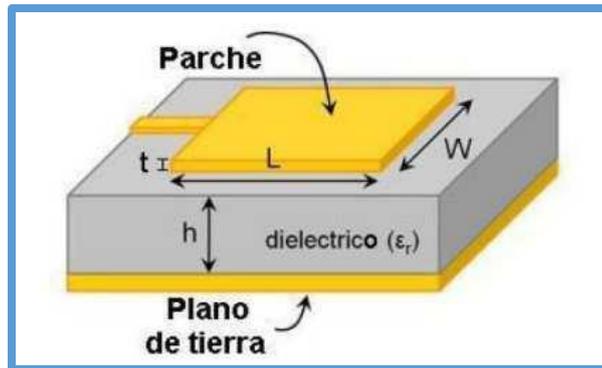
En cuestiones de aplicaciones a redes WLAN por su agosta cobertura solo se la utilizaría como puente entre dos routers o como parte del CPE enlazado a la celda del ISP o lo contrario podría estar en el ISP pero jamás como acceso de usuarios.

La antena grilla también puede ser implementada a la tecnología MIMO ya que es compatible con el estándar Wi-Fi 802.11n. Una ventaja muy importancia es su resistencia al viento pero también necesita mantenimiento por su estructura armada con tornillos y tuercas.

### **5.1.7 Antena Panel (microstrip)**

Las antenas de parche impresas son típicamente antenas planas usadas ampliamente en sistemas de comunicaciones inalámbricas en general presentan ventajas como estructura simple, bajo costo, bajo perfil, tamaño pequeño. [37]

Las microcintas, como se aprecia en la Figura 44 son dispositivos de bajo perfil, que por sus ventajas son ampliamente utilizadas en los sistemas de comunicaciones. Las líneas de microcinta son líneas de transmisión planares no homogéneas, usadas generalmente en radiofrecuencia y microondas. Se basan en un plano tierra separado de una línea conductora por un material dieléctrico, dicha línea conductora es de cobre, cuyo espesor es suficientemente delgado en relación a la longitud de onda en el espacio libre para la frecuencia de trabajo, en la siguiente Figura se dan a conocer los parámetros mencionados y que se deben tener en cuenta para líneas de microcinta: [38]



**Figura 44. Línea de microcinta y parámetros. [37]**

En donde:

**W**= Ancho de la línea

**L**= Largo de la línea

**t**= Grosor de la línea

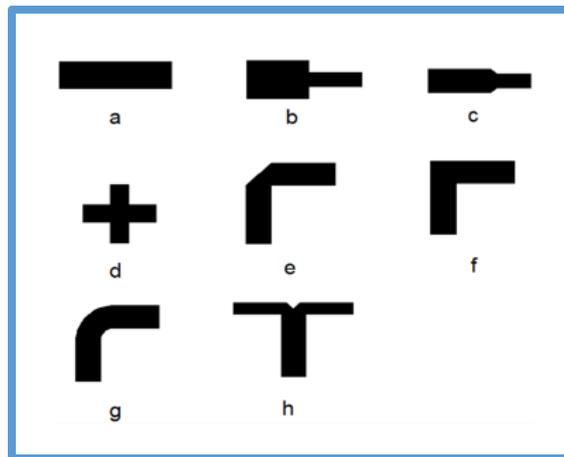
**h**= Altura del dieléctrico

También hay que tomar en cuenta la constante de permitividad relativa del sustrato y, adicionalmente, en la figura anterior se aprecia que el conductor en su parte superior está rodeado de aire mientras que en la parte posterior del sustrato se encuentra el plano tierra, entonces las dimensiones de la cinta conductora se calculan de forma que se disipe la potencia en forma de radiación, esta afirmación es un tanto contradictoria, pues en las líneas de transmisión, se busca que exista el mínimo de radiaciones, pero en éste caso se refiere a la línea como elemento radiador, denominada antena parche. Este tipo de antenas son de fácil elaboración y bajo costo con respecto a reflectores parabólicos y otros tipos de estructuras, son combinables con circuitos integrados de microondas y se pueden diseñar para trabajar a diversas frecuencias con distintas polarizaciones aunque dependiendo de qué tan alta sea la frecuencia de trabajo, las dimensiones de la microcinta se verán reducidas. [39]

Al elaborar diseños geométricos de antenas microstrip se presentan efectos denominados discontinuidades en las microcintas, se presentan al existir un cambio

en la forma de la línea, lo cual provoca variaciones en el campo eléctrico  $E$  y magnético  $H$  produciendo ondas estacionarias.

Las discontinuidades son proporcionales a la frecuencia de trabajo, y al no ser compensadas de forma adecuada llegan a provocar desacoples, cambios de fase, alto VSWR. Pero, no sólo se presentan para afectar de forma negativa, en muchos casos se introducen para mejorar las características del circuito, como acoples o filtros. Cuando las líneas se mantienen en longitud y ancho no es necesario compensar los efectos de la discontinuidad, pero en arreglos de antenas se usa mucho el cambio de forma de las líneas, ya sea en su ancho y largo para el cambio de impedancias. [38]



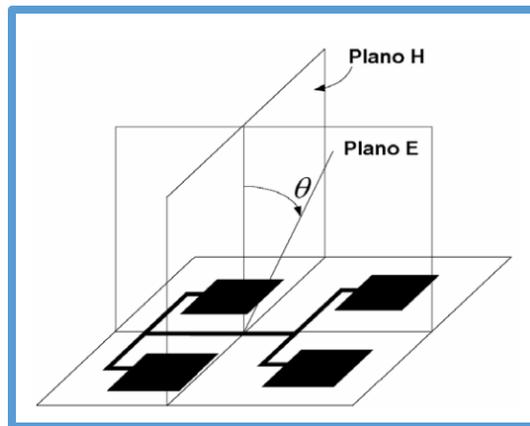
**Figura 45. Discontinuidades en las líneas: a) Línea constante b) Cambio abrupto de impedancia c) Cambio semi-abrupto de impedancia d) Unión en cruz e) Unión en L con biselado f) Unión en L con ángulo recto g) Unión en L con bisel curvo h) Unión en T con biselado. [38]**

Las líneas de microcintas se ven afectadas por varios parámetros que dependen de la frecuencia de trabajo, pues al ser más baja el sistema es más robusto, pero en frecuencias mayores el sistema se ve afectado en la geometría y su precisión para el diseño. Los aspectos más comunes que insertan pérdidas son por conductor, por dieléctrico y radiación. [38]

El efecto de borde se debe a la extensión de los campos en los contornos de la geometría del panel, se debe tomar en cuenta dicho efecto porque éste afecta a la frecuencia de resonancia de la antena, y depende del ancho  $W$  del panel, el largo  $L$ ,

además de las características del dieléctrico de la antena como son el espesor  $h$  junto con la permitividad del material. El efecto de borde se puede reducir con la relación  $L/h > 1$ . [39]

El patrón de radiación de un arreglo de antenas microstrip contiene las distribuciones de campo, tanto eléctrico como magnético, la amplitud de estos campos decrece con la distancia de propagación. En el presente proyecto se debe conocer la ubicación de los planos para estos campos con referencia a la geometría de la antena. En la siguiente figura se indica un arreglo de antena planar de cuatro elementos, en donde se distingue la ubicación de los planos magnético y eléctrico, perpendiculares entre sí. [38]

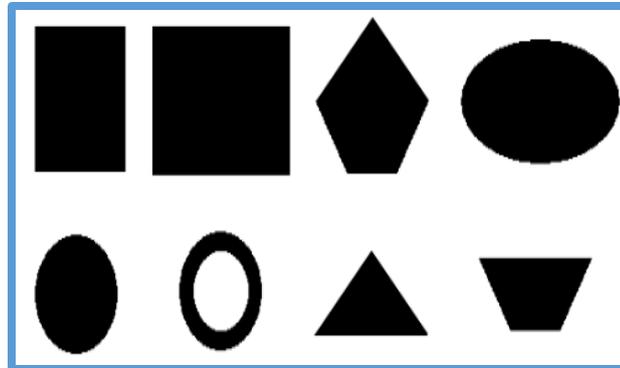


**Figura 46. Plano E y H para arreglo de microcinta. [38]**

La ubicación de estos planos hace factible el análisis de la distancia de separación que debe existir entre parches; el acople mutuo entre los elementos del arreglo depende exclusivamente de la separación que exista entre ellos, de allí que se inicia la búsqueda de la separación óptima en el plano magnético (H), para posteriormente buscar dicha separación con los parches sobre el plano eléctrico (E), y así completar el arreglo como tal. [39]

Las topologías para antenas de microcinta son numerosas, y en base a estas se define el método de análisis que precede el funcionamiento del parche en ciertas

condiciones de propagación, en la siguiente figura se indica las topologías típicas utilizadas en el diseño de antenas de microcinta. [10]



**Figura 47. Principales topologías de antenas Parche. [10]**

Al igual que las topologías, existen varias formas de excitación para las antenas de microcinta, entre las más populares, está la alimentación por línea de microcinta, la alimentación por línea coaxial, acoplamiento de apertura, y acoplamiento de proximidad. Estos métodos de alimentación pueden ser clasificados en: métodos de alimentación directa (microcinta, coaxial) y métodos de alimentación sin contacto (acoplamiento por apertura y proximidad) [40].

**Tabla 2. Comparación entre los diferentes métodos de alimentación.**

TIPO DE ALIMENTACIÓN	RADIACIONES ESPURIAS	FACILIDAD DE FABRICACIÓN	ACOPLAMIENTO DE IMPEDANCIA
LÍNEA DE MICROCINTA	ALTAS	FÁCIL	FÁCIL
LÍNEA COAXIAL	NOTABLES	NECESIDAD DE SOLDARSE A LA LÍNEA COAXIAL	FACIL
ACOPLAMIENTO DE APERTURA	POCAS	ALINEAMIENTO REQUERIDO	COMPLEJO
ACOPLAMIENTO DE PROXIMIDAD	MÍNIMAS	ALINEAMIENTO REQUERIDO	FÁCIL

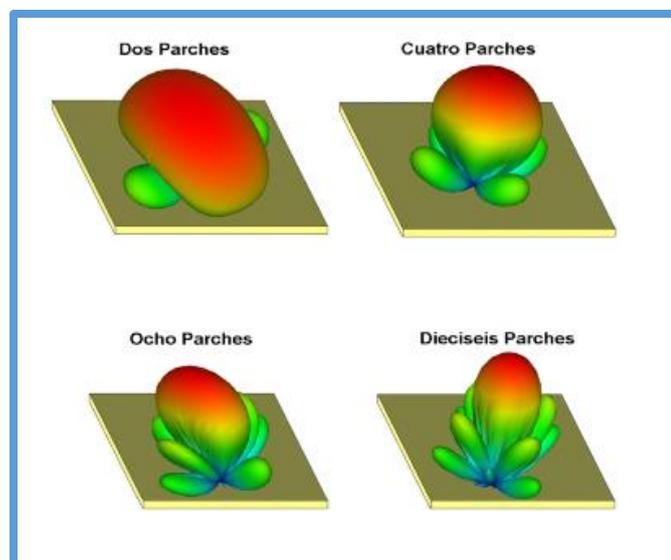
Fuente: Desing of a circular polarization Microstrip antenna at 2.4 GHz. Tesis Doctoral.

La combinación de elementos radiadores puede realizarse de forma lineal, planar o a su vez ser combinadas en un arreglo a nivel tridimensional. Dependiendo como

sea el arreglo de parches, se puede obtener diferentes cambios en el patrón de radiación característico de una antena parche, que involucra a la ganancia y directividad.

Para que exista un patrón de radiación simétrico con respecto a un punto fijo de alimentación, se deben configurar  $2n$  ( $n=2, 4, 6\dots$ ) elementos, siendo  $n$  el número de elementos del arreglo, además la red de alimentación formada por diferentes líneas de microcinta debe ayudar a mantener la fase requerida para que la antena presente características uniformes en su patrón de radiación. [38]

Cuando se agrupan los parches, ciertas características de radiación se ven anuladas y toda esa cancelación de energía pasa a formar parte del lóbulo principal de radiación, pero también hay que tener cautela con la distancia de separación de los parches, ya que si va más allá de la media longitud de onda, el nivel que presenten los lóbulos laterales se irá incrementando, y por ende el lóbulo principal de radiación será atenuado, y la antena por lo tanto presenta características pobres de radiación. [38]



**Figura 48. Patrón de Radiación para arreglo de parches. [38]**

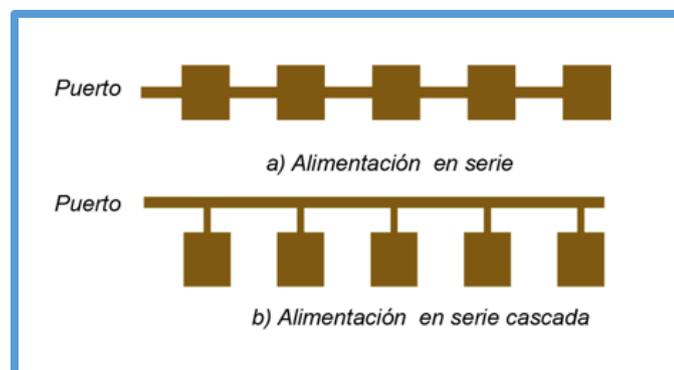
En la figura anterior se aprecia el efecto que se presenta al ir conformando el arreglo lineal de parches, el parche solo presenta características omnidireccionales (un

amplio ancho de haz), por ende, una antena muy poco directiva y con poca ganancia, no presenta niveles de lóbulos de radiación lateral. Ahora si se considera ya el arreglo formado por dos parches, vemos que la radiación en determinadas direcciones es atenuada, pero siguiendo la ley de la conservación de la energía, esta pasa a formar parte del lóbulo principal de radiación, con lo que la antena gana características directivas, y la ganancia aumenta, pero también se forman lóbulos de radiación lateral, que como se ha comentado, su nivel tiene que ser controlado, para ello es preciso ajustar la distancia de separación entre los parches a la óptima.

Ya en el arreglo de parches de 2x2 se tiene bien definido un lóbulo de radiación principal y este arreglo forma una antena con un incremento en la directividad puesto que la energía de determinados sectores pasa a formar parte del lóbulo de radiación principal, y si se sigue construyendo el arreglo de parches de forma lineal, se obtiene un comportamiento similar a los expuestos con el número de parches precedente. [38]

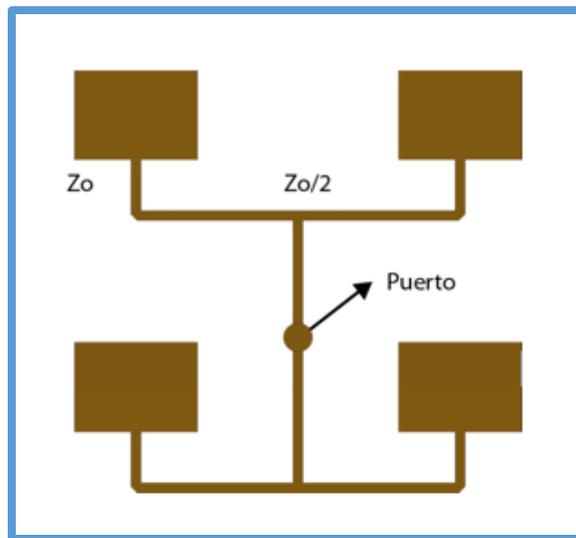
Existen dos formas para conformar arreglos de antenas microstrip los cuales dan características diferentes al arreglo en si al momento del diseño.

La primera forma de conformar arreglos se define como arreglo en serie también conocida como red de alimentación en cascada, en donde una sola línea de microcinta une los parches, esto hace que la impedancia total de la antena sea el aporte de cada parche al arreglo.



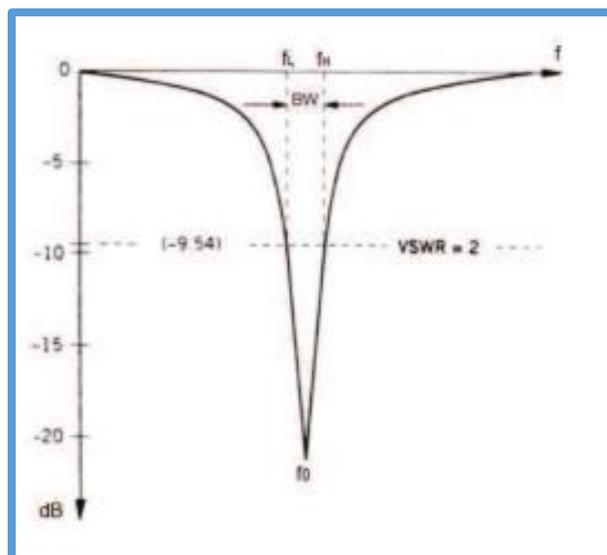
**Figura 49. Red de alimentación en serie. [41]**

La red de alimentación en paralelo también se la conoce como alimentación combinada, este tipo de red, tiene la propiedad de presentar cambios de impedancia en la interconexión de los ramales que conforman el sistema, esta es una de las propiedades importantes con las que cuenta este tipo de red, además, la flexibilidad que brinda esta topología para el dominio de su geometría hacen de ella una buena opción a la hora de elegir qué tipo de red para alimentación se ha de utilizar.



**Figura 50. Red de alimentación en paralelo. [41]**

Para el buen funcionamiento de las antenas parche se sugiere un sustrato dieléctrico grueso, que tenga una constante dieléctrica baja, esto proporciona una mejor eficiencia, un ancho de banda más grande y una mejor radiación. Esto hace que el ancho de banda de la antena de este tipo oscile entre el 2 y 5% de su frecuencia de trabajo por lo que el funcionamiento de la antena dependerá mucho del sustrato empleado y de su grosor.



**Figura 51. Ancho de una antena Microstrip. [42]**

En cuestión de aplicaciones las antenas tipo parche o microstrip tienen uso en las telecomunicaciones móviles y las inalámbricas, debido principalmente a su bajo coste, peso y volumen reducidos, entre sus principales aplicaciones tenemos las siguientes. [42]

- Rango de frecuencias de 100 MHz a 50 GHz.
- Comunicaciones móviles.
- Aeronáutica.
- Retransmisión de tv en directo.
- Náutica.
- Biomédicas.
- Telemetría.
- Observación de la tierra.
- Sistemas de vigilancia.

### **5.1.8 Data sheet Antena Panel**

En esta sección se analizarán las antenas microstrip existentes en el mercado, para esto se presentan los datasheet donde constan las características de cada antena.

- **Antenas NanoStationM Indoor/Outdoor airMAXCPE Models: NSM2, NSM3, NSM365, NSM5, locoM2, locoM5, locoM9**

El NanoStation M y NanoStation LOCOM toman el mismo concepto para el futuro con factores de forma elegante y junto con la tecnología integrada Airmax (protocolo TDMA MIMO) son la opción más óptima en cuestión de enlaces.

El bajo costo, alto rendimiento, y el factor de forma pequeño de NanoStation M y NanoStation LOCOM hacen extremadamente versátil y económica de implementar.

Todos los modelos de antenas NanoStation vienen incluido el transmisor con el software de configuración y sus aplicaciones van desde interiores hasta exteriores.



**Figura 52. Diseño físico integrado con el transmisor de las antenas Ubiquiti NanoStation. [43]**

A continuación se presenta las características eléctricas de los diferentes variantes en cuestión de modelos de las antenas Ubiquiti NanoStation.

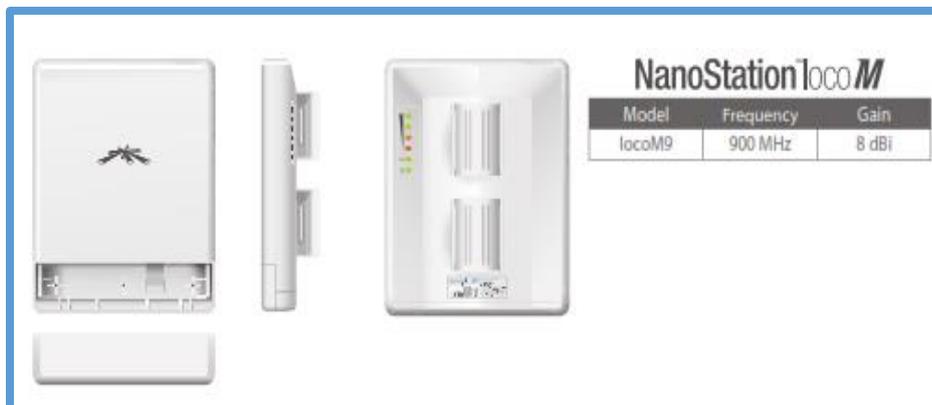
Physical/Electrical/Environmental						
Model	NSM5	NSM3/365	NSM2	locoM5	locoM2	locoM9
Dimensions (mm)	294 x 31 x 80	294 x 31 x 80	294 x 31 x 80	163 x 31 x 80	163 x 31 x 80	164 x 72 x 199
Weight	0.4 kg	0.5 kg	0.4 kg	0.18 kg	0.18 kg	0.9 kg
Power Supply (PoE)	24V, 0.5A	24V, 0.5A	24V, 0.5A	24V, 0.5A	24V, 0.5A	24V, 0.5A
Max. Power Consumption	8 W	8 W	8 W	5.5 W	5.5 W	6.5 W
Gain	16 dBi	13.7 dBi	11 dBi	13 dBi	8 dBi	8 dBi
RF Connector	-	-	-	-	-	External RP-SMA
Polarization	Dual Linear					
Enclosure Characteristics	Outdoor UV Stabilized Plastic					
Mounting	Pole Mounting Kit Included					
Power Method	Passive Power over Ethernet (pairs 4, 5+; 7, 8 return)					
Operating Temperature	-30 to 75° C					
Operating Humidity	5 to 95% Condensing					
Shock & Vibration	ETSI300-019-1.4					

Operating Frequency Summary (MHz)					
Model	NSM5/locoM5	NSM365	NSM3	NSM2/locoM2	locoM9
Worldwide	5170 - 5875	3650-3675	3400-3700	2412-2462	902-928
USA	5725 - 5850				
USA DFS	5250 - 5850	-	-	-	-

**Figura 53. Especificaciones físicas y eléctricas de los dispositivos Ubiquiti NanoStation. [43]**

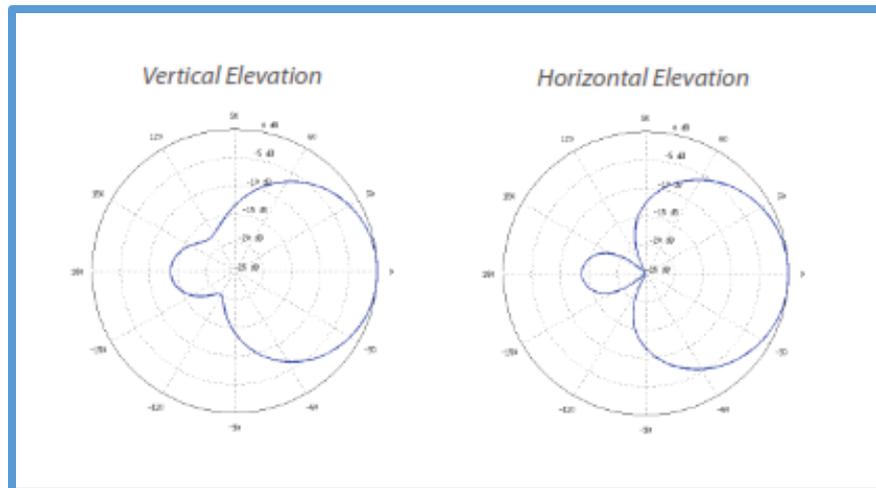
➤ **Especificaciones NanoStationlocoM9**



**Figura 54. Diseño físico del dispositivo Nano StationlocoM9. [43]**

Antenna Information	
Gain	7.5 dBi
Cross-pol Isolation	28 dB Minimum
Max. VSWR	1.3:1
Beamwidth	60° (H-pol) / 60° (V-pol) / 60° (Elevation)

**Figura 55. Especificaciones técnicas de la antena del dispositivo Nano StationlocoM9. [43]**



**Figura 56. Patrón de radiación de la antena del dispositivo Nano StationlocoM9. [43]**

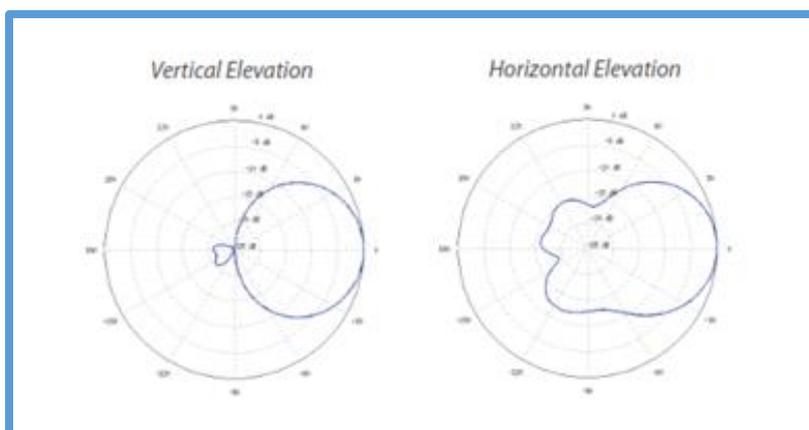
➤ **Especificaciones NanoStationlocoM2**



**Figura 57. Diseño físico del dispositivo NanoStationlocoM2. [43]**

Antenna Information	
Gain	8.5 dBi
Cross-pol Isolation	20 dB Minimum
Max. VSWR	1.4:1
Beamwidth	60° (H-pol) / 60° (V-pol) / 60° (Elevation)

**Figura 58. Especificaciones técnicas de la antena del dispositivo NanoStation locoM2. [43]**



**Figura 59. Patrón de radiación de la antena del dispositivo NanoStation locoM2. [43]**

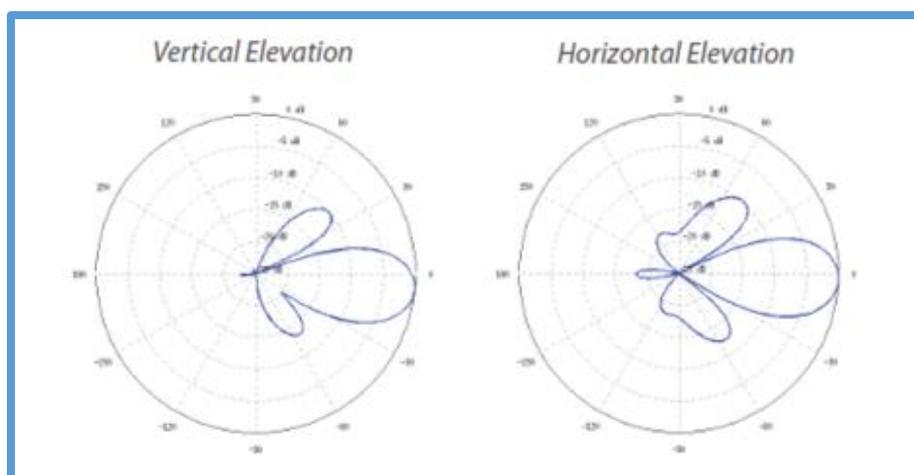
➤ **Especificaciones NanoStation locoM5**



**Figura 60. Diseño físico del dispositivo NanoStation locoM5. [43]**

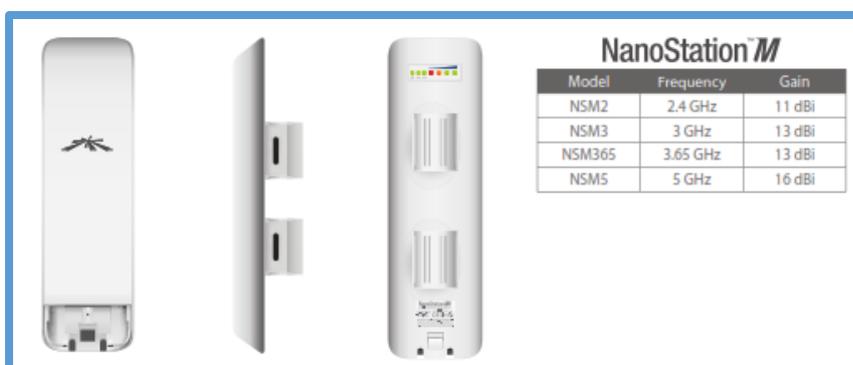
Antenna Information	
Gain	13 dBi
Cross-pol Isolation	20 dB Minimum
Max. VSWR	1.4:1
Beamwidth	45° (H-pol) / 45° (V-pol) / 45° (Elevation)

**Figura 61. Especificaciones técnicas de la antena del dispositivo NanoStation locoM5. [43]**



**Figura 62. Patrón de radiación de la antena del dispositivo NanoStation locoM5. [43]**

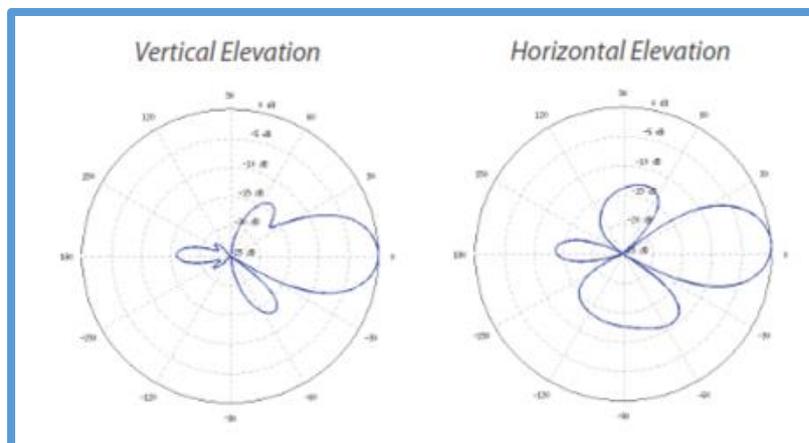
➤ **Especificaciones NanoStationM2**



**Figura 63. Diseño físico del dispositivo NanoStationM2. [43]**

Antenna Information	
Gain	10.4-11.2 dBi
Cross-pol Isolation	23 dB Minimum
Max. VSWR	1.6:1
Beamwidth	55° (H-pol) / 53° (V-pol) / 27° (Elevation)

**Figura 64. Especificaciones técnicas de la antena del dispositivo NanoStationM2. [43]**



**Figura 65. Patrón de radiación de la antena del dispositivo NanoStationM2. [43]**

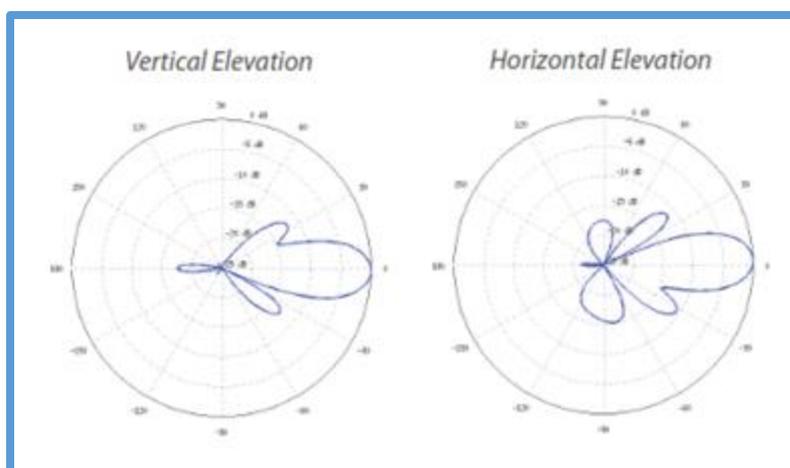
➤ **Especificaciones NanoStationM2/M365**



**Figura 66. Diseño físico del dispositivo NanoStationM2/M365. [43]**

Antenna Information	
Gain	12.2 - 13.7 dBi
Cross-pol Isolation	28 dB Minimum
Max. VSWR	1.4:1
Beamwidth	60° (H-pol) / 60° (V-pol) / 20° (Elevation)

**Figura 67. Especificaciones técnicas de la antena del dispositivo NanoStationM2/M365. [43]**



**Figura 68. Patrón de radiación de la antena del dispositivo NanoStationM2/M365. [43]**

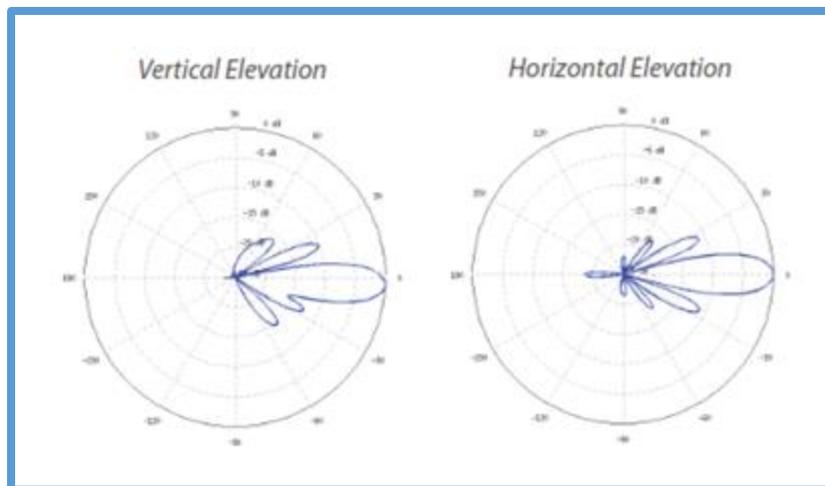
➤ **Especificaciones NanoStationM5**



**Figura 69. Diseño físico del dispositivo NanoStationM5. [43]**

Antenna Information	
Gain	14.6 - 16.1 dBi
Cross-pol Isolation	22 dB Minimum
Max. VSWR	1.6:1
Beamwidth	43° (H-pol) / 41° (V-pol) / 15° (Elevation)

**Figura 70. Especificaciones técnicas de la antena del dispositivo NanoStationM5. [43]**



**Figura 71. Patrón de radiación de la antena del dispositivo NanoStationM5. [43]**

### 5.1.9 Limitaciones Antena Panel (microstrip)

Las antenas microstrip pueden ser directivas sectoriales u omnidireccionales dependiendo de su diseño u forma de las agrupaciones de sus elementos radiadores.

Estas antenas como podemos observar en los datasheet poseen todas las características de las antenas Yagi y Grilla es decir pueden ser muy directivas como sectoriales y hasta omnidireccionales. Es decir posee muchas ventajas en comparación a las demás tanto en patrón de radiación, diseño físico, miniaturización, mimetización e integración al dispositivo transmisor.

Pero su principal limitación como se observa en la figura 53, es su potencia la cual está entre 5 y 8 watt a diferencia de las antenas Yagi y Grilla que soportan potencias de 50 a 100 watt. Esto se debe a que son manufacturadas con pistas en circuito impreso, esto tiene como costo no poder manejar mucha potencia lo que hace que sean fácilmente afectadas por el factor térmico sobre todo si se trabaja con sustratos muy delgados.

El ancho de banda es otra limitante en las antenas microstrip ya que es de 2 a 5% de la frecuencia de trabajo como se lo explica en la figura 51. Para aumentar el ancho de banda debe aumentarse el grosor del sustrato.

En muchos casos, esta limitación de frecuencia de operación puede ser benéfico para el desempeño del radio. Debido a sus características las antenas microstrip no son muy adecuadas para equipos de comunicación de banda amplia, es decir para recepción de TV.

## **5.2 ELECCIÓN DE LA ANTENA MÁS ÓPTIMA PARA REDES WLAN**

Para empezar con la elección del arreglo de antenas más óptimo se debe especificar la aplicación dentro de las redes WLAN. Lo que se requiere es un arreglo de antenas donde se pueda tener versatilidad de diseño en los parámetros más importantes como son ganancia, patrón de radiación e impedancia de entrada.

Es importante esta versatilidad para poder utilizar las antenas tanto en posición Indoor como Outdoor es decir tanto como acceso, puente o conectada a la celda del ISP.

Las aplicaciones Indoor hacen que se requiera mimetización y miniaturización además de la integración al dispositivo transmisor. Otra característica muy importante es que tenga compatibilidad con la tecnología MIMO (802.11n).

Las antenas microstrip cumplen todas las necesidades expuestas además sus únicas limitaciones son su potencia y reducido ancho de banda. Pero poseen ventajas que sobrepasan significativamente sus limitaciones.

Las antenas microstrip tienen la versatilidad de diseño, en cuestión de patrón de radiación mediante la agrupación de parches, se puede tener una antena omnidireccional, sectorial o muy directiva.

A nivel de diseño se parte de la impedancia de entrada lo cual sirve a nivel de implementación ya que si se integra la antena a un transmisor mediante pigtail se puede partir conociendo la impedancia del pigtail para hacer el diseño.

Todas estas consideraciones están basadas y justificadas por los datasheet presentados anteriormente de las antenas NanoStation en donde se observa que es posible todo lo descrito sobre sus ventajas y porque es la más óptima para redes WLAN.

A continuación se efectuara un diseño de arreglo de antenas microstrip para implementarlo en un transmisor con tecnología MIMO para redes WLAN el cual es el tema del presente proyecto de tesis.

### **5.3 DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ANTENAS MICROSTRIP**

Para la etapa de diseño se debe especificar las características de la antena, la antena debe resonar a una frecuencia de 2.4 GHz ya que esta frecuencia está dentro del estándar 802.11n, la frecuencia de 2.4GHz pertenece a la banda ISM y posee 11 canales separados 5MHz de los cuales solo no se solapan 3.

La impedancia de entrada del arreglo se especificara en 50 Ohm porque es el valor de impedancia más común tanto en transmisores y pigtail.

Se diseñara un arreglo de antenas parche 2x2 pero se debe partir de un parche individual.

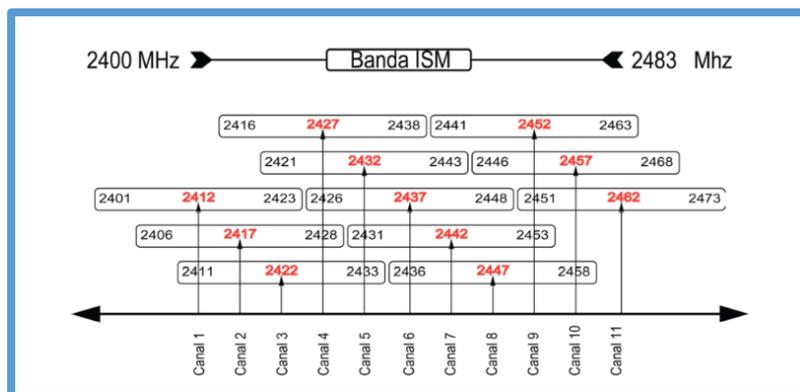


Figura 72. Banda ISM en la frecuencia de 2.4GHz. [44]

Las características del arreglo de antena a diseñar son las siguientes:

Tabla 3. Características de diseño del arreglo microstrip.

Características de Diseño de Antenas Microstrip	
Topología	Rectangular
Frecuencia	2.4GHz
Impedancia de entrada	50 Ohm
ROE	Menor a 2
Red de alimentación	Paralelo
Dimensión del arreglo	2x2
Tipo de alimentación	Coaxial
Tipo de sustrato	FR4

Se decidió la utilización de sustrato FR4 ya que permite desarrollar un mayor ancho de banda pero, sufriendo una reducción en la eficiencia, además es el que con mayor felicidad se puede comprar en el mercado local. Las características eléctricas de importancia para el diseño de antenas microstrip son la permitividad relativa del dieléctrico usado como sustrato (4.3) y el grosor o altura del sustrato (1.5mm). Las características completas del sustrato FR4 se presentaran en la sección de anexos.

Los parches rectangulares se analizan mediante el método de línea de transmisión, el cual solo se puede aplicar a este tipo de topología, este análisis es el más sencillo de comprender pero es un tanto poco preciso. [44]

Las características del campo y resonancia del parche se determinan por la longitud del mismo, las ecuaciones de este método están en base al largo y ancho del parche para una frecuencia en particular. [9]

El modelo de línea de transmisión establece una permitividad eléctrica efectiva que combinada la permitividad eléctrica del aire con la del sustrato y asume que la antena se encuentra inmersa dentro de un medio homogéneo con permitividad constante en toda su superficie. [45]

A continuación se presentan las ecuaciones del método de línea de transmisión para calcular en ancho y largo de la microcinta.

$$\lambda_o = \frac{c}{f} \quad (5.2.1)$$

$$\lambda_m = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (5.2.2)$$

$$f_r = \frac{f_{max} + f_{min}}{2} \quad (5.2.3)$$

$$W = \frac{c}{2 * f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (5.2.4)$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{-1/2} \quad (5.2.5)$$

$$\frac{\Delta l}{h} = 0.42 \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (5.2.6)$$

$$L = \frac{c}{2 * f_r * \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta l \quad (5.2.7)$$

A continuación se representan las ecuaciones en diseño físico. [46]

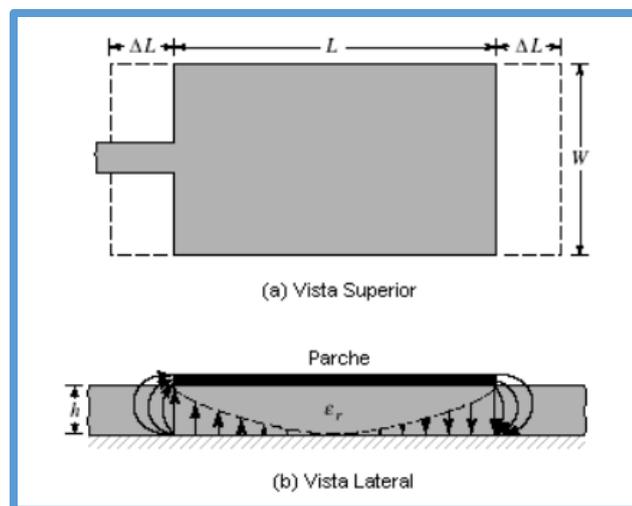


Figura 73. Longitudes físicas y efectivas de una parche de microcinta. [46]

$\lambda_0$  = Longitud de onda en el vacío dada en metros

$\epsilon_{reff}$  = Constante dieléctrica efectiva (adimensional)

$h$  = Espesor del dieléctrico dado en metros

$\lambda_m$  = Longitud de onda de la microcinta dada en metros

$Z_0$  = Impedancia característica

$W$  = Ancho de la microcinta

$\Delta L$  = Extensión de Longitud

$L$  = longitud del parche

$f_r$  = Frecuencia de trabajo

Entonces se procede a obtener los valores de conductancia de la siguiente manera:

$$G_1 = \frac{I_1}{120\pi^2} \quad (5.2.8)$$

En donde:

$$I = \int_0^\pi \left[ \frac{\text{sen}\left(\frac{ko*W}{2} * \cos(\theta)\right)}{\cos(\theta)} \right]^2 \text{sen}(\theta)^3 d\theta \quad (5.2.9)$$

También es necesario determinar la conductancia del modelo de transmisión equivalente G12, esto se hace usando la función de Bessel de primera clase de orden cero como se indica en la siguiente ecuación.

$$G12 = \frac{1}{120\pi} \int_0^\pi \left[ \frac{\text{sen}\left(\frac{ko*W}{2} * \cos(\theta)\right)}{\cos(\theta)} \right]^2 \text{sen}(\theta)^3 Jo(ko * L * \text{sen}\theta) d\theta \quad (5.2.10)$$

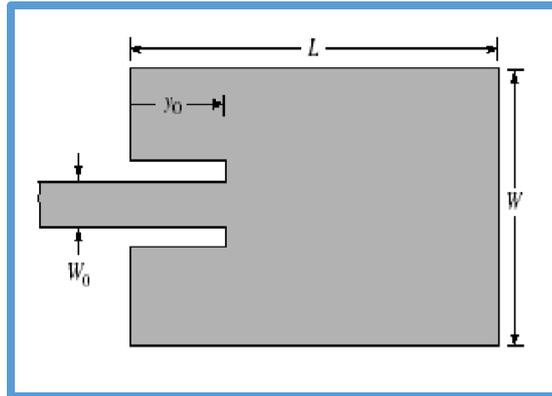
Conocidos estos dos valores se procede a determinar el valor que corresponde a la resistencia de resonancia a la entrada del parche.

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \quad (5.2.11)$$

Dicho resultado corresponde al valor de la resistencia que se obtiene en la entrada del parche como tal.

Ahora bien, en éste caso se dispone de la resistencia de entrada, y lo que se necesita conocer es la longitud de entrada de la ranura ( $y_o$ ), para ello se tiene que hacer el despeje de este valor en la ecuación. [44]

$$R_{in}(y = y_o) = R_{in}(y = 0) \text{Cos}^2\left(\frac{\pi}{L}\right) y_o \quad (5.2.12)$$



**Figura 74. Punto de alimentación del parche microstrip. [46]**

Se desarrolló un script de Matlab para diseño de antenas microstrip por el método de línea de transmisión para la simplificación del procedimiento matemático del método de línea de transmisión descrito anteriormente. Se procedió a separarlo en cinco partes las cuales se dividen en ingreso de la información necesaria, cálculo de las longitudes del parche, cálculo de las impedancias características del método de línea de transmisión, cálculo de las ranuras del parche y presentación de los resultados necesarios para un óptimo diseño de las antenas tipo parche tanto como elemento individual y en el arreglo 2x2.

El código del script se lo presentara en la sección de anexos de forma detallada. A continuación se presenta una imagen que muestra lo que el script nos permite ingresar para los cálculos de diseño y los valores obtenidos del mismo.

```

=====
DISEÑO DE ANTENA TIPO PARCHES DE FORMA RECTANGULAR
=====
Dielectrico:
Grosor del sustrato en mm:
Frecuencia en Ghz:
Impedancia en ohm Zin:
=====
RESULTADOS = DIMENSIONES E IMPEDANCIAS
=====
Ancho del Parche (W) es:          mm
Longitud del Parche (L) es:      mm
Longitud de la Ranura (Yo) es:   mm
Ancho de la Microcinta (Wf) es:  mm
Ancho de la Ranura (Gpf) es:    mm
Longitud = Linea de Transmision (Lf) es: mm
Ancho del Plano de Tierra (Wg) es: mm
En arreglos == Separacion de Parches (dh=de) es: mm
=====
Longitud de onda es:            mm
Longitud de onda m es:         mm
=====

```

**Figura 75. Presentación del script de Matlab.**

Una vez que tenemos definido el método de diseño debemos adquirir un software para simular y así justificar la implementación de nuestros diseños.

La siguiente tabla muestra una comparación entre dos distintos software los cuales utilizan distintitos tipos de métodos de análisis, por un lado esta CST el cual utiliza el método FDTD y FEKO utiliza el método de momentos el cual se basa en cálculo de corrientes, según las necesidades del material para la implementación y el computador que se posee para el análisis computacional, se han colocado los respectivos checks.

**Tabla 4. Comparación de software con sus características para elección del más idóneo.**

<b>SOFTWARE</b>	<b>CST</b>	<b>FEKO</b>
<b>Método de Análisis</b>	<b>FDTD</b>	<b>MOM</b>
Análisis ha materiales pocos conductivos no homogéneos.	✓	
Tratamiento eficiente de superficies que sean altamente conductoras.		✓
Simple para implementar en el análisis electromagnético.	✓	
Tiempo de resolución razonable.	✓	
Respuesta de un rango de frecuencia de una sola corrida.	✓	
Método altamente eficiente para geometrías complejas.	✓	

El programa de simulación CST MICROWAVE STUDIO de la empresa CST (Computer Simulation Technology), es una herramienta especializada para la simulación electromagnética en tres dimensiones de componentes de alta frecuencia, implementa métodos de análisis de tipo onda completa, concretamente el Método de la Integración Finita en el Dominio del Tiempo (FITD). El CST MICROWAVE STUDIO ofrece rápidamente un vistazo del comportamiento electromagnético de los diseños de alta frecuencia y brinda una gran flexibilidad a los usuarios mediante un rango de aplicación muy amplio, gracias a la variedad de tecnologías disponibles. [47]



**Figura 76. Interfaz del software CST Microwave Studio.**

Otra importante ventaja del software CST es que podemos realizar diseños en AutoCAD y exportarlos a la ventana de trabajo del software lo que da facilidad al momento de optimizar dimensiones de la antena.

En vista de lo expuesto, la aplicación CST Microwave Studio es completa y factible a ser utilizada para la simulación y elección de los prototipos a implementar.

### **5.3.1 Diseño de una parche microstrip rectangular**

Para empezar a diseñar la antena microstrip parche individual debemos ingresar la siguiente información al script de Matlab.

```
=====
DISEÑO DE ANTENA TIPO PARCHES DE FORMA RECTANGULAR
=====
Dielectrico: 4.3
Grosor del sustrato en mm: 1.5
Frecuencia en Ghz: 2.437
Impedancia en ohm Zin: 50
=====
```

**Figura 77. Datos de ingreso en el script de Matlab.**

A lo cual el script calculara las dimensiones del parche microstrip.

```

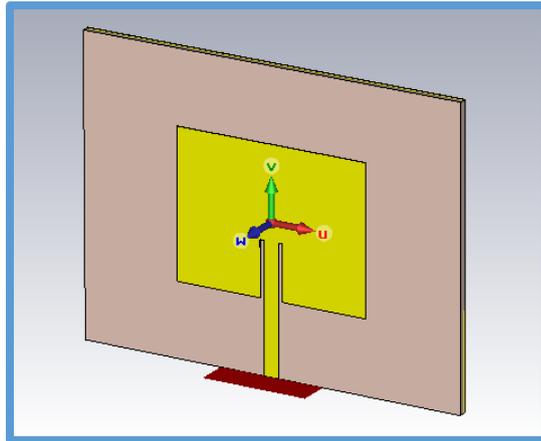
=====
                        RESULTADOS = DIMENSIONES E IMPEDANCIAS
=====
Ancho del Parche (W) es: 37.8105 mm
Longitud del Parche (L)es: 29.3538 mm
Longitud de la Ranura (Yo) es: 10.8649 mm
Ancho de la Microcinta (Wf) es: 2.849 mm
Ancho de la Ranura (Gpf) es;): 0.20218 mm
Longitud = Linea de Transmision (Lf) es: 15.3722 mm
Ancho del Plano de Tierra (Wg) es: 4.5 mm
    
```

**Figura 78. Resultados de las dimensiones del parche microstrip.**

**Tabla 5. Dimensiones del parche para resonar a 2.4 GHz.**

LONGITUD (L)	29.3538 mm	
ANCHO (W)	37.8105 mm	
LONGITUD DE LA RANURA (YO)	10.8649 mm	
ANCHO DE LA MICROCINTA (Wf)	2.849 mm	
ANCHO DE LA RANURA (Gpf).	0.20218 mm	
LINEA DE TRANSMISION (Lf)	15.3722 mm	
PLANO TIERRA (Wg)	4.5 mm (opcional)	

A continuación se procedió a realizar el diseño en el software CST y simular sus parámetros de pérdidas de retorno, frecuencia de resonancia, VSWR, patrón de radiación, ganancia y directividad.



**Figura 79. Diseño de la antena microstrip en CST.**

Los primeros parámetros de simulación son las pérdidas por retorno y la frecuencia de resonancia también conocidos como parámetros S11.

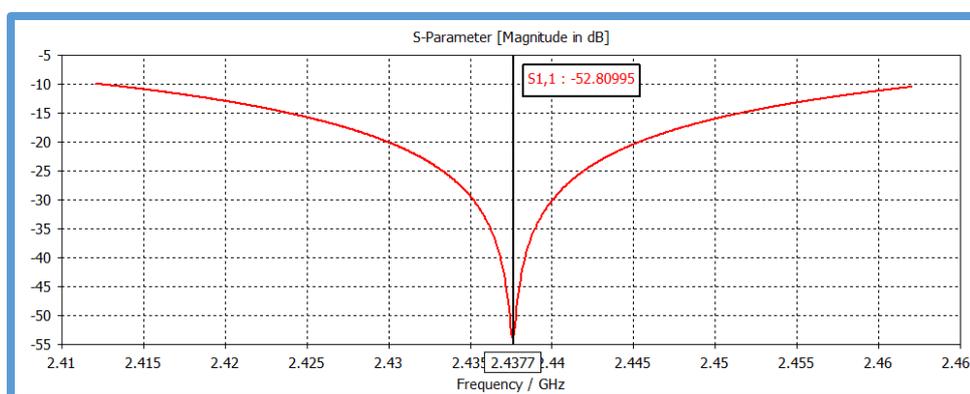
En primera instancia las dimensiones calculadas por el script no satisficieron los parámetros S11, por lo que es necesario usar la optimización, que no es más que ir cambiando las medidas del diseño hasta obtener resultados favorables al diseño. Tras la optimización se obtuvieron las siguientes dimensiones en donde se pudo analizar que la longitud y el ancho del parche infiere estrictamente con la frecuencia de resonancia y son inversamente proporcional. Por otra parte el ancho de la ranura y el ancho de la microcinta caracterizan la impedancia de entrada de la antena.

**Tabla 6. Dimensiones del parche optimizado para resonar a 2.4 GHz.**

LONGITUD (L)	<b>28.38 mm</b>
ANCHO (W)	<b>37.15 mm</b>
LONGITUD DE LA RANURA (YO)	<b>10.69 mm</b>
ANCHO DE LA MICROCINTA (Wf)	<b>2.89 mm</b>

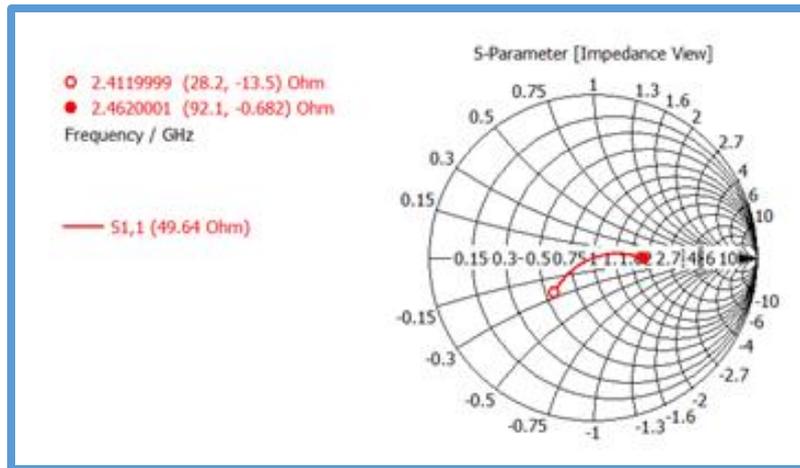
ANCHO DE LA RANURA ( <b>Gpf</b> ).	<b>0.718 mm</b>
LINEA DE TRANSMISION ( <b>Lf</b> )	<b>15.3722 mm</b>
PLANO TIERRA ( <b>Wg</b> )	<b>4.5 mm (opcional)</b>

Se publican las simulaciones del parche microstrip tras obtener las medidas optimizadas.



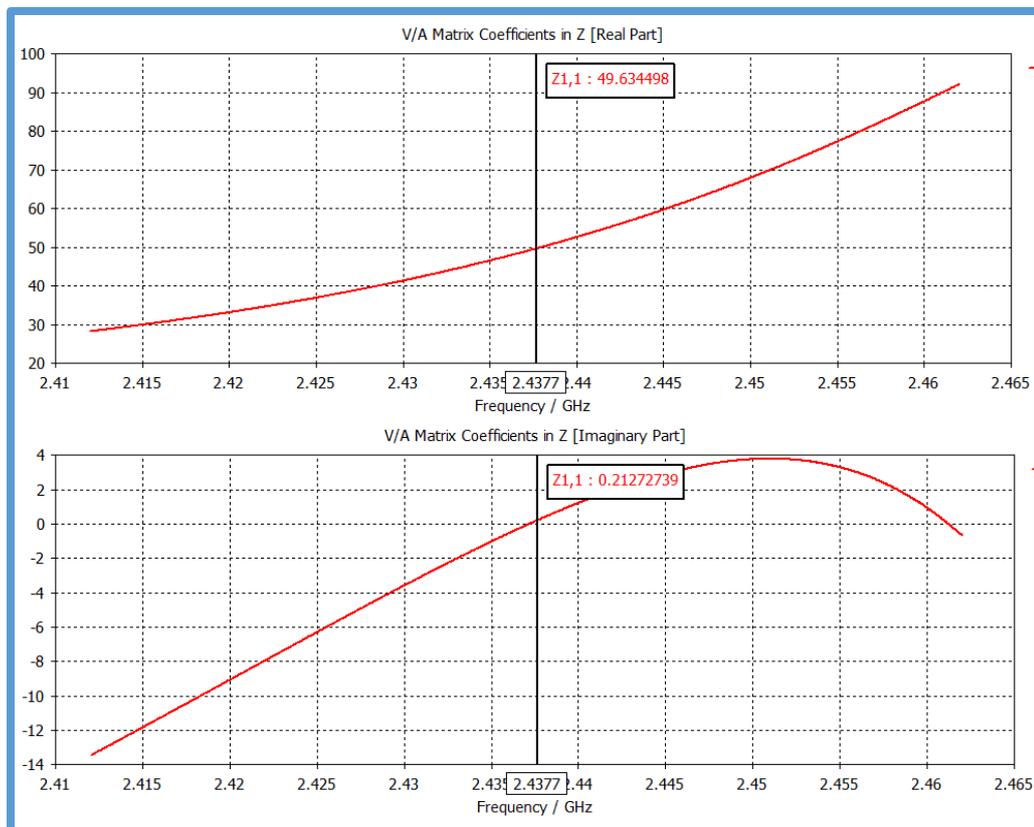
**Figura 80. Pérdidas por retorno y frecuencia de resonancia.**

Podemos observar que la simulación de la antena esta resonando a 2.437 GHz la cual es la frecuencia de trabajo de la banda de 2.4 GHz y posee un ancho de banda de 2% y que se lo toma en cuenta por debajo de los -10 dB, el ancho de banda obtenido integra los 11 canales de la frecuencia de 2.4 GHz (2.412 a 2.462 GHz), el ancho de banda es muy reducido como se lo explico en la sección de antenas microstrip. Las pérdidas por retorno se encuentran a -52.80 dB lo que indica un VSWR muy bajo y un buen acople de impedancias a 50 Ohm.



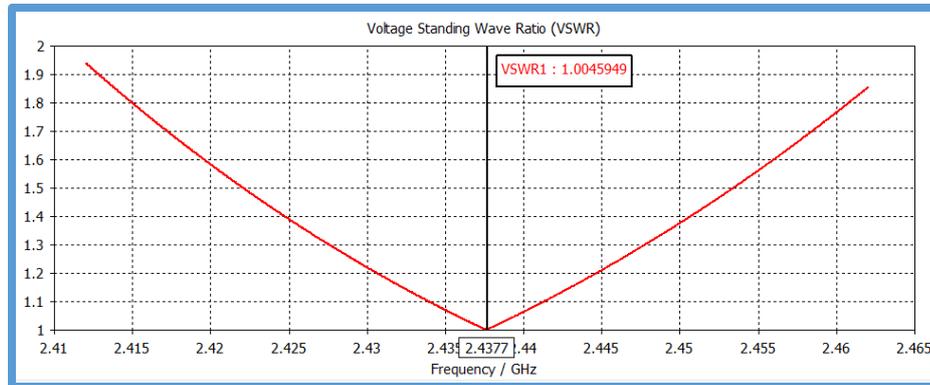
**Figura 81. Carta de Smith de acople de impedancia de entrada.**

En la siguiente figura se publica los niveles de la impedancia de entrada del parche, recordando que la ecuación denota que para que haya máxima transferencia de energía la reactancia o la parte imaginaria debe ser lo más cercana a cero y la parte real debe estar próximo a la impedancia requerida en los parámetros de diseño.



**Figura 82. Impedancia de Entrada Z, Parte Real e Imaginaria.**

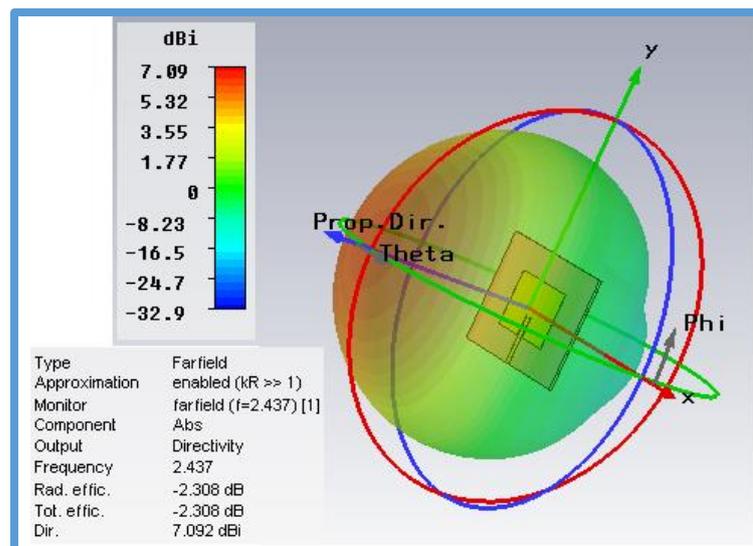
La impedancia de entrada de la línea de transmisión con el parche microstrip se encuentra 49.64 Ohm y la reactancia está en 0.21 cercana a cero, lo que significa un buen acople y por ende un VSWR muy bajo de 1.008 como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 83. Razón de voltaje de onda estacionario VSWR.**

Esta grafica nos indica una medida de cuanto energía no se está irradiando de la antena como podemos ver es muy bajo ya que el valor máximo permitido es 2.

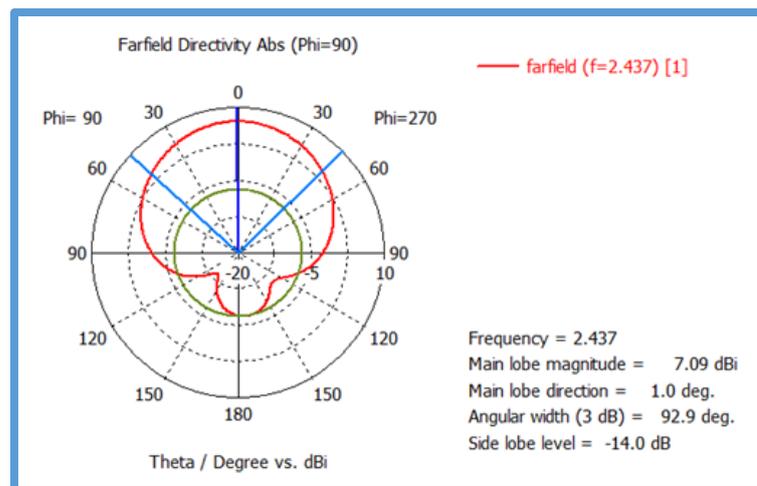
Los siguientes parámetros simulados son el patrón de radiación lo cual involucra la ganancia, directividad y ancho de haz.



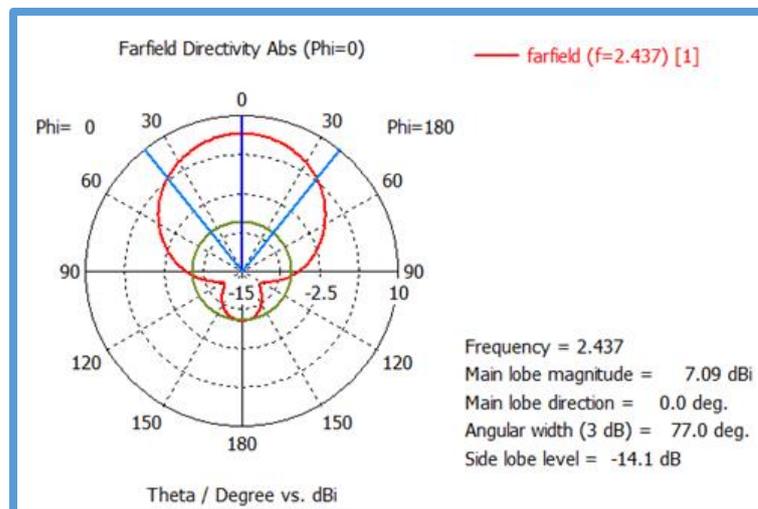
**Figura 84. Patrón de radiación del parche.**

En el patrón de radiación podemos observar que es simétrico y posee una ganancia de 7.09 dBi el cual es un valor aceptable para un parche individual.

Para visualizar y analizar de manera correcta se publica el diagrama de radiación en coordenadas polares pudiendo observar una vez más la simetría y además podremos visualizar tanto en 0 y 90 grados.



**Figura 85. Patrón de radiación polar en 90 grados.**



**Figura 86. Patrón de radiación polar en 0 grados.**

Se publica tanto en 0 y 90 grados es decir lateral y superior para poder observar la forma del lóbulo principal con respecto a los lóbulos secundarios. Por ser un parche

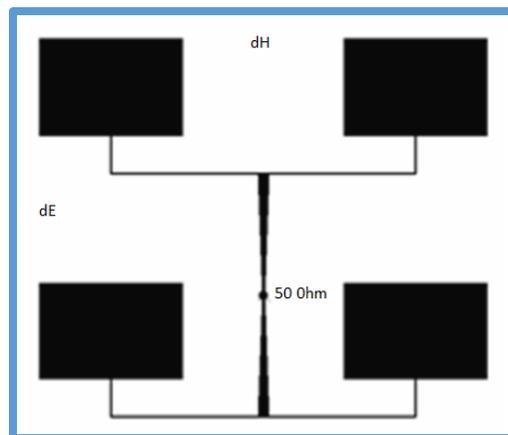
individual se tiene un ancho de haz a -3 dB amplio de 92.9° a 90° y 77° a 0° con una magnitud de lóbulo principal de 7.09 dBi y de lóbulo secundario de -14dB la cual no debe superar los -10dB para que sea aceptable a implementación.

Una vez analizada la simulación y los resultados obtenidos se concluye que el diseño es óptimo a implementación.

### 5.3.2 Diseño de un arreglo de antenas microstrip 2x2

Para empezar a diseñar el arreglo 2x2 se tiene que tener en cuenta la red de acople en paralelo y la separación de los parches.

En los arreglos en paralelo se tiene consideración que la impedancia de entrada (50 Ohm) ya no estará en el parche si no en el centro de la red de alimentación en paralelo como se muestra en la siguiente figura.



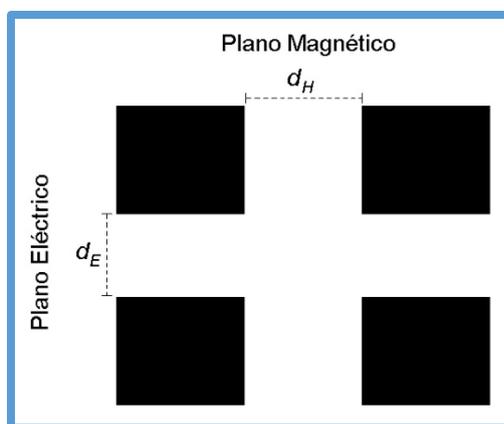
**Figura 87. Arreglo 2x2 con red de alimentación en paralelo. [9]**

La separación de los parches está dada con la siguiente relación de la longitud de onda de la microcinta.

$$dH = dE > \frac{\lambda_m}{2} \quad (5.2.13)$$

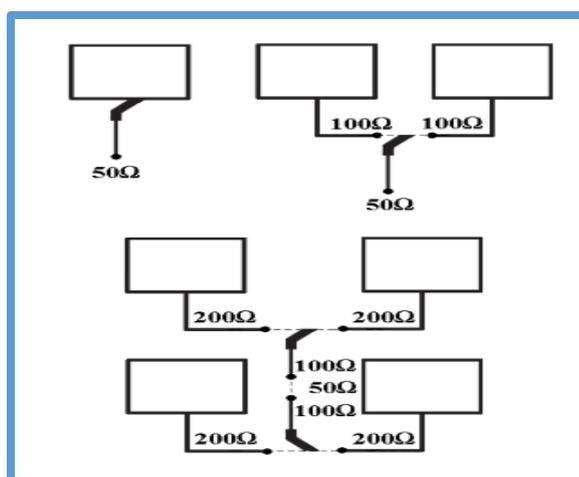
La separación de los parches que inicia en media longitud de onda de la microcinta influye en la ganancia y directividad es decir si la separación cada vez es menor esto

disminuye la directividad y la ganancia pero también aumenta el nivel de lóbulos secundarios y el ancho de haz es por eso que se debe elegir una separación adecuada para obtener parámetros que justifiquen la implementación.



**Figura 88. Separación en el plano E y H. [9]**

En cuestión de impedancias se debe de tener mucho cuidado ya que la red de alimentación en paralelo tiene la impedancia característica en el centro de la red, y cada unión es un divisor de impedancia, es decir la línea que une dos parches actúa como si la impedancia de cada parche estuvieran en paralelo, por ende la línea resultante de la unión tendría otro valor de impedancias, si los dos parches tienen iguales impedancias, la impedancia de la línea resultante sería la mitad de la impedancia de un parche.



**Figura 89. Funcionamiento de divisores de impedancia en la red en paralelo. [9]**

Según la figura anterior para diseñar el arreglo 2x2 que posea una impedancia de entrada de 50 ohm debemos tener un parche con impedancia de entrada de 200 ohm, pero a nivel de implementación no es posible ya que la línea de transmisión tendría un ancho demasiado pequeño para fabricarla es por eso que se debe implementar acopladores de impedancia en las uniones de los parches para así reducir la impedancia del parche de entrada a 100 ohm la cual si es factible en implementación.

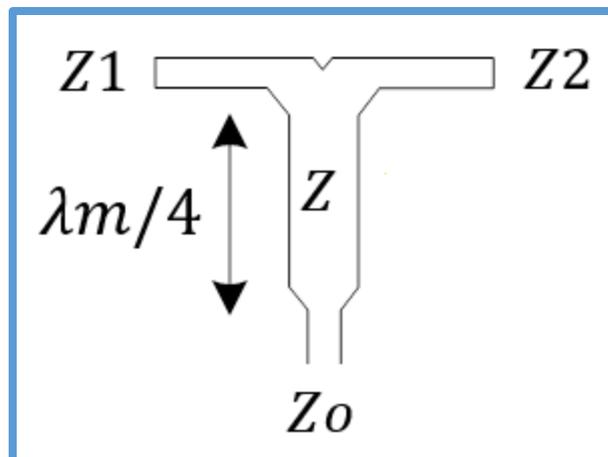
El acoplador a utilizar es de cuarto de longitud de onda que consiste en modificar el ancho de la línea de la unión de los parches para mantener la impedancia de los parches en la línea central.

Este acoplador tendrá una longitud eléctrica de cuarto de longitud de onda y mientras más delgada sea una línea de transmisión más impedancia tendrá y entre más larga mayor longitud eléctrica.

En el siguiente grafico se entenderá mejor el acoplamiento. [48]

$$Z_o = \frac{Z_1 * Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{Z_1}{2} \quad \text{si } Z_1 = Z_2 \quad (5.2.14)$$

$$Z = \frac{Z_o}{\sqrt{2}} \quad (5.2.15)$$



**Figura 90. Acople de impedancias. [48]**

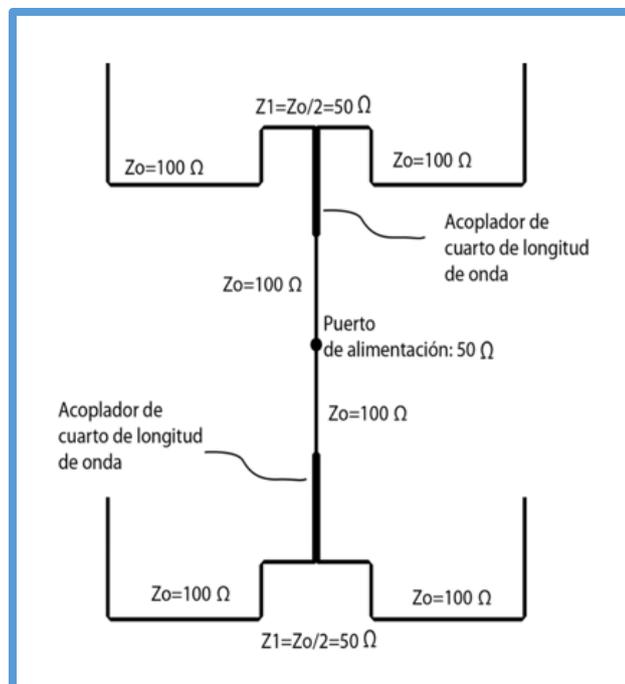
Calculo de Z:

$$Z_1=Z_2= 100 \text{ Ohm}$$

$$Z_o = \frac{100}{2} = 50 \text{ Ohm}$$

$$Z = \frac{50}{\sqrt{2}} = 70.71 \text{ Ohm}$$

En la siguiente figura se puede apreciar la forma del diseño de la red de alimentación en paralelo con acopladores de cuarto de longitud de onda para obtener una impedancia de entrada del arreglo de 50 Ohm.



**Figura 91. Diseño de la red de acople para el arreglo 2x2. [44]**

Con la impedancia del acople de cuarto de onda obtendremos el ancho para la línea de 100 Ohm y el ancho del acoplador de 70.71 Ohm en las siguientes tablas.

$\epsilon$ relativo	H	$W_1$	$u(W_1/h)$	$\epsilon$ efectivo	$Z_0$
4.3	1.5	0.8	0.4	2.97359162	104.830957
4.3	1.5	0.9	0.45	2.99239866	100.442824
4.3	1.5	1	0.5	3.01005952	96.5413128

Tabla 1. Ancho de línea para una impedancia característica  $Z_0 = 100\Omega$ .

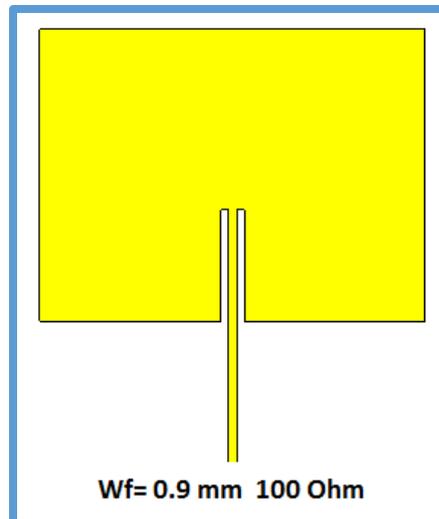
$\epsilon$ relativo	H	$W_1$	$u(W_1/h)$	$\epsilon$ efectivo	$Z_0$
4.3	1.5	1.9	0.95	3.13600271	73.4980842
4.3	1.5	2	1	3.14749372	71.7296886

Tabla 2. Ancho de línea de longitud  $\lambda/4$ .

**Figura 92. Tablas para obtener el ancho de línea para  $Z_0$  y  $Z$  [49]**

Entonces el ancho para la línea de 100 Ohm es 0.9 mm y 2 mm para el ancho del acoplador de longitud de  $\lambda m/4$ .

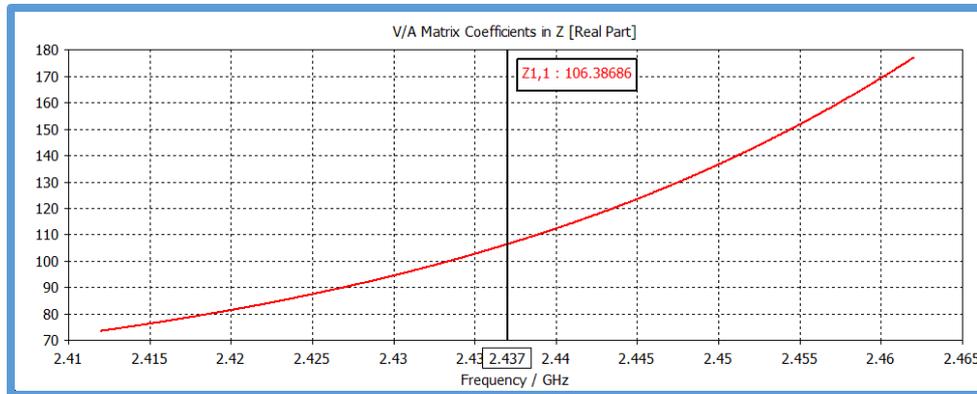
Para poder corroborar el ancho de la línea de 100 Ohm se procede a simular un parche individual para verificar su impedancia de entrada.



**Figura 93. Diseño del parche con impedancia de entrada 100Ohm.**

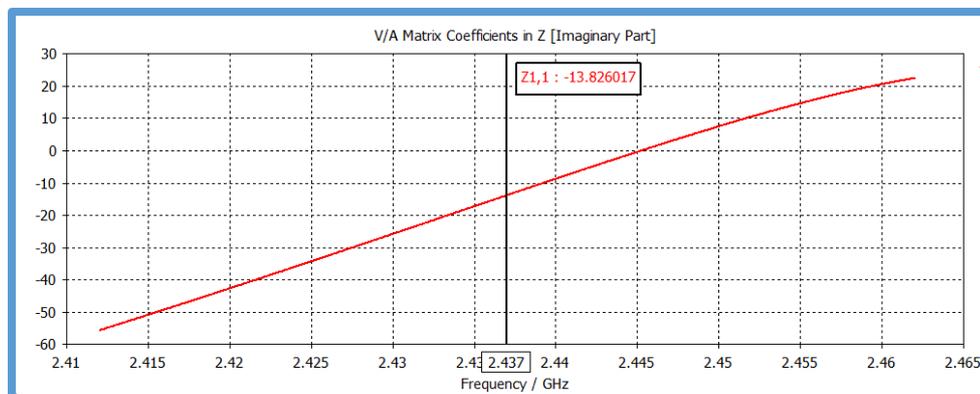
En la siguiente figura se demuestra que el ancho de la línea de microcinta para un parche resonando a 2.437GHz debe ser de 0.9mm, para que su impedancia de entrada rodee los 100 Ohm.

La figura 94 publica la parte real de la impedancia de entrada del parche, en donde se justifica el ancho utilizado ya que la parte real se encuentra en los 106,38 Ohm en la frecuencia de 2,437 GHz.



**Figura 94. Impedancia de Entrada Z, Parte Real.**

La impedancia de entrada Z, consta de una parte real y una imaginaria la cual para que haya un óptimo acople y mayor transferencia de energía debe estar cercana a cero, en la figura 95 se publica la parte imaginaria de la impedancia de entrada la cual está en un nivel de -13,8 por debajo de cero.



**Figura 95. Impedancia de Entrada Z, Parte Imaginaria.**

Se puede verificar en las figuras anteriores que la impedancia de entrada del parche con la línea de microcinta de 0.9 mm de ancho es de 106.3808 Ohm, por ende se procede a agrupar 4 parches con la red de alimentación con los acopladores de  $\lambda m/4$  que se diseñó anteriormente.

El diseño del arreglo se lo realiza en AutoCAD como anteriormente se menciona es posible exportar el diseño geométrico desde Auto CAD hacia CST Microwave Studio para que la simulación sea precisa en cuestión de medidas. Los requisitos que debe tener el archivo de Auto CAD son:

- El archivo debe estar en la escala de milímetros
- El archivo debe estar conformado por dos capas una para el dieléctrico o sustrato FR4 y otra para el copper (cobre).
- Como recomendación no debe haber líneas sobre puestas ya que esto causaría que no se exporte de manera correcta el archivo.
- Por ultimo debe guardarse el archivo en formato DXF.

Para el diseño en AutoCAD se deberá seguir la siguiente tabla con las medidas obtenidas anteriormente. El diseño completo acotado en AutoCAD se lo publica en la sección de anexos para mejor entendimiento.

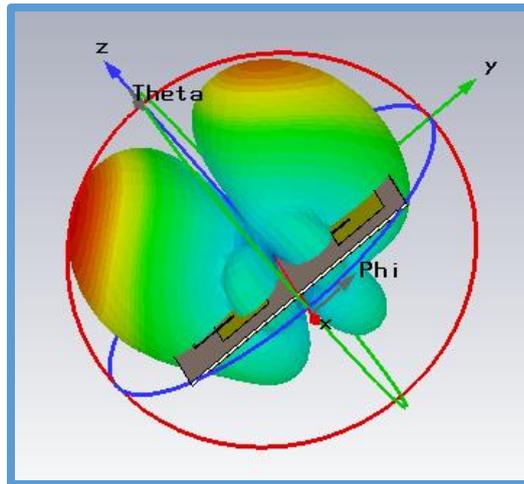
**Tabla 7. Dimensiones para el diseño en AutoCAD del arreglo 2x2.**

<b>Línea de microcinta de cada parche</b>	<b>0.9 mm</b>
<b>Largo del acoplador de <math>\lambda m/4</math></b>	<b>15.37 mm</b>
<b>Ancho del acoplador <math>\lambda m/4</math></b>	<b>2 mm</b>
<b>dH y dE</b>	<b>30.74 mm</b>
<b>Puerto del arreglo 2x2</b>	<b>Centro de la red de alimentación</b>
<b>Plano de tierra</b>	<b>14 mm de cada extremo de los parches (opcional)</b>

Para el arreglo 2x2 de 4 parches se realizara las mismas simulaciones que en el parche individual, se analizaran los parámetros S11 y el diagrama de radiación.

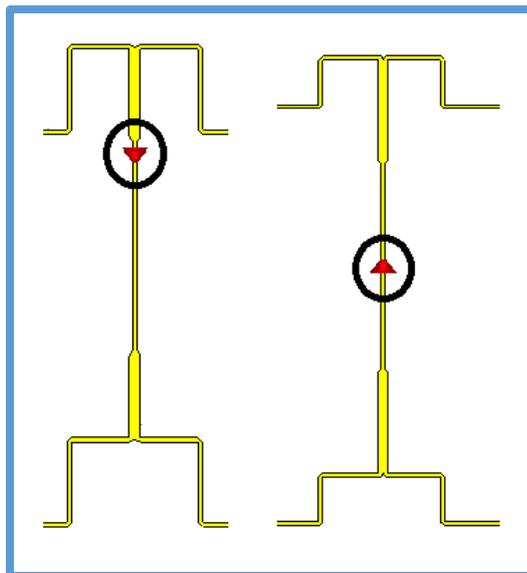
Como en el caso anterior en la primera simulación no se obtuvieron resultados óptimos para la implementación.

El primer resultado no óptimo fue la no simetría del patrón de radiación y el elevado nivel de los lóbulos secundarios como se observa en la siguiente figura.



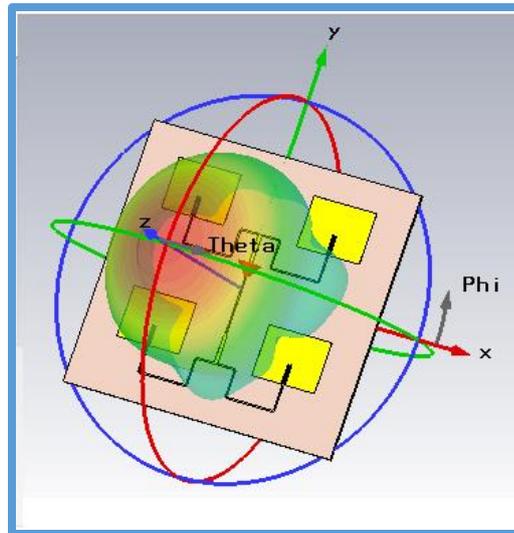
**Figura 96. Patrón de radiación asimétrico del arreglo 2x2.**

Para resolver este problema en el patrón de radiación se procede a realizar un desfase eléctrico del puerto de alimentación de la antena que no es más que cambiar la posición de la alimentación como se observa en la siguiente figura.



**Figura 97. Desfase eléctrico de la posición del puerto del arreglo 2x2.**

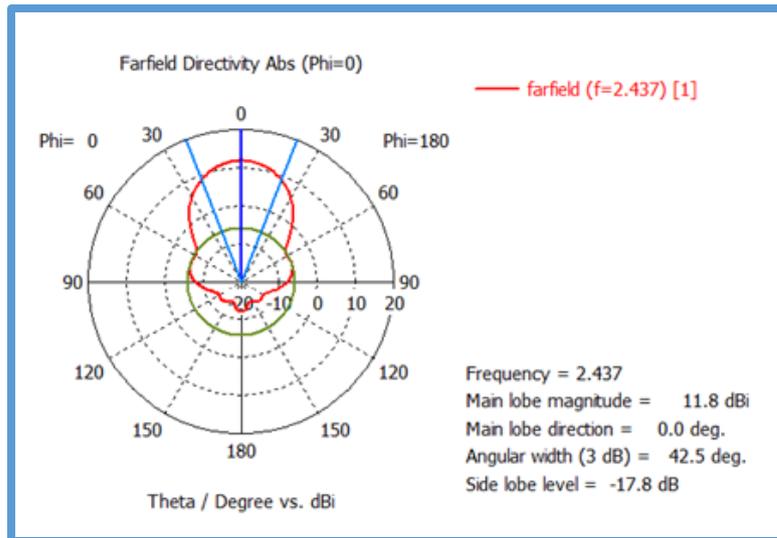
En la figura anterior el puerto de la derecha ofrecía en simulación un patrón de radiación asimétrico mientras que el de la izquierda se establece un patrón simétrico y directivo de radiación. Pero los lóbulos secundarios tenían niveles superiores a los -10dB y se tuvo que cambiar la separación de los parches. Se inició con media longitud de onda del dieléctrico pero esos resultados no justificaban implementación y se procedió a realizar simulaciones basadas en prueba vs error hasta conseguir la distancia optima de 42 mm.



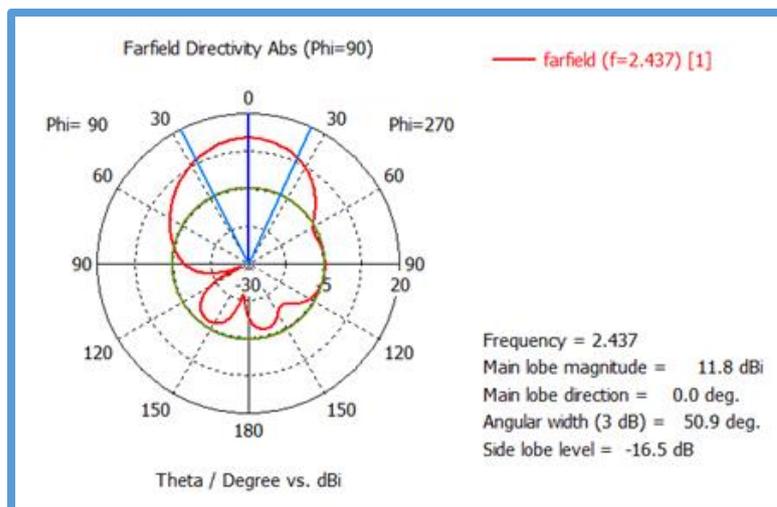
**Figura 98. Patrón de radiación simétrico del arreglo 2x2.**

Todos estos ajustes ofrecen resultados óptimos como simetría en el patrón de radiación y bajos niveles de lóbulos secundarios.

Se grafica el patrón de radiación en coordenadas polares tanto en  $0^\circ$  y  $90^\circ$  visualizando de forma lateral y superior del diagrama de radiación.



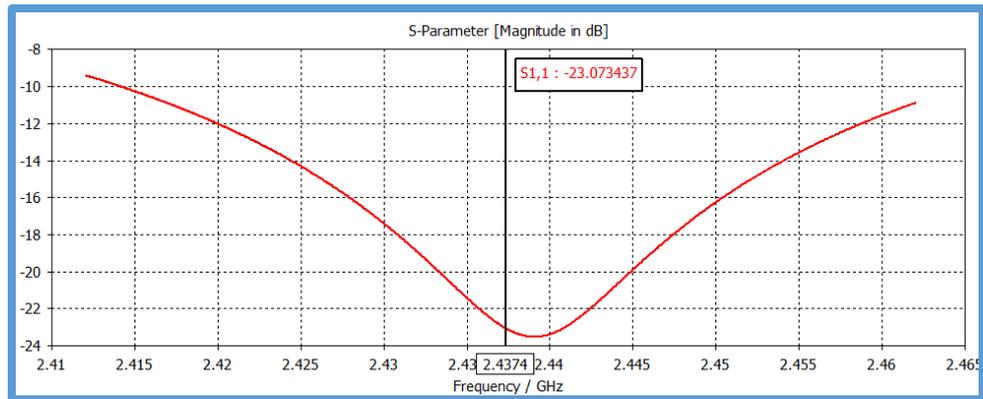
**Figura 99. Patrón de radiación polar en 0 grados.**



**Figura 100. Patrón de radiación polar en 90 grados.**

En la simulación podemos observar niveles de lóbulo secundario muy bajos de -16.5 dB y una ganancia de 11.8 dBi con un ancho de haz a -3dB de 50.9 grados lo que comprueba la teoría de la agrupación de parches para hacer la antena más directiva disminuyendo el ancho de haz.

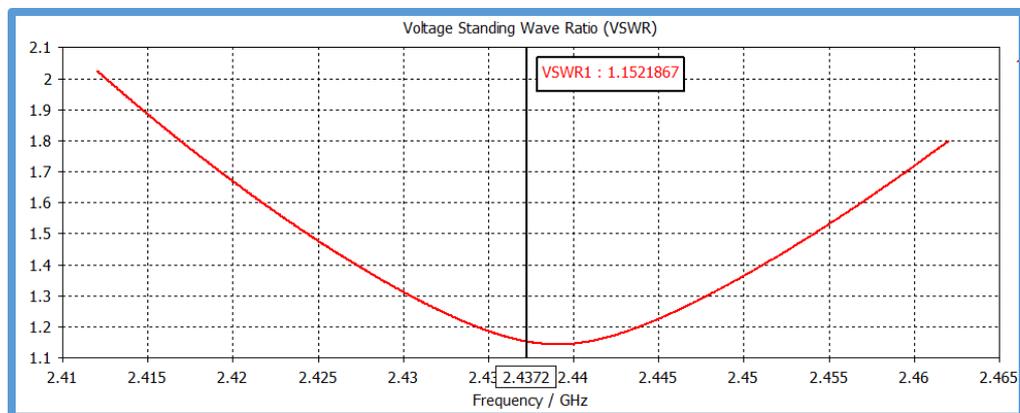
La siguiente simulación corresponde a los parámetros S11 tanto en frecuencia de resonancia, impedancia de entrada y VSWR.



**Figura 101. Frecuencia de resonancia del arreglo 2x2 en simulación CST.**

Las pérdidas por retorno están a nivel de -23 dB lo que significa un VSWR muy bajo dando una satisfactoria calidad de transmisión del arreglo.

En cuestión de ancho de banda posee un 2% el cual se lo empieza a medir a partir de los -10 dB, la única forma de mejorar este parámetro es cambiar de sustrato por uno más grueso de menor coeficiente.

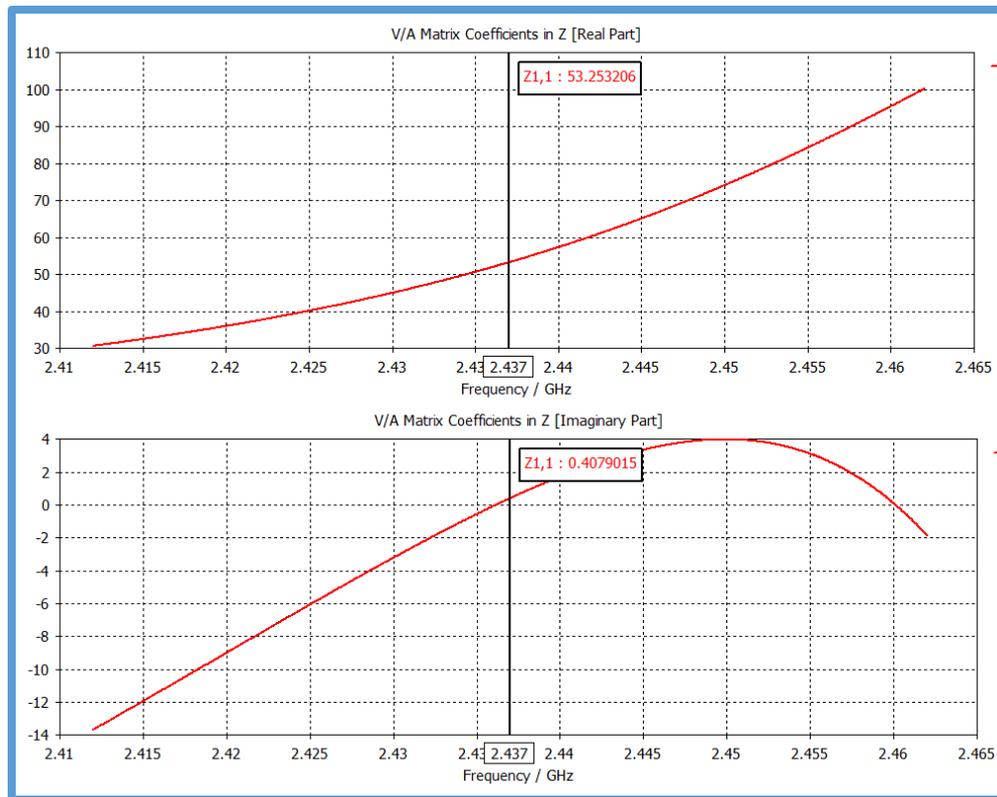


**Figura 102. Razón de voltaje estacionario en el arreglo 2x2.**

Por las bajas pérdidas por retorno en simulación el parámetro de relación de onda estacionaria será bajo de 1.15 lo que significa que el arreglo posee una óptimo calidad de radiación.

Finalmente se publica la impedancia de entrada  $Z$  del arreglo 2x2 verificando que la parte real de la impedancia este próxima a 50 Ohm que fue lo propuesto en las

características de diseño y la parte imaginaria o reactancia se encuentre cercana a cero para tener un óptimo acople en la alimentación del arreglo 2x2. Efectivamente la parte real de la impedancia de entrada  $Z$  se encuentra en 53.25 Ohm y la parte imaginaria en 0.40 siendo valores satisfactorios de acoplamiento.



**Figura 103. Impedancia de Entrada  $Z$ , Parte Real e Imaginaria del Arreglo 2x2.**

Los resultados en simulación son óptimos para justificar su implementación.

### 5.3.3 Implementación de Diseños Simulados

El proceso de construcción de los prototipos consta de absoluto cuidado y precisión, pues al estampar el diseño sobre el FR4 se pueden presentar situaciones adversas que dañan o cambian el correcto funcionamiento en las antenas, como son sus parámetros de ganancia, directividad, impedancia, frecuencia de operación entre otros.

**Tabla 8. Lista de Materiales para Implementación.**

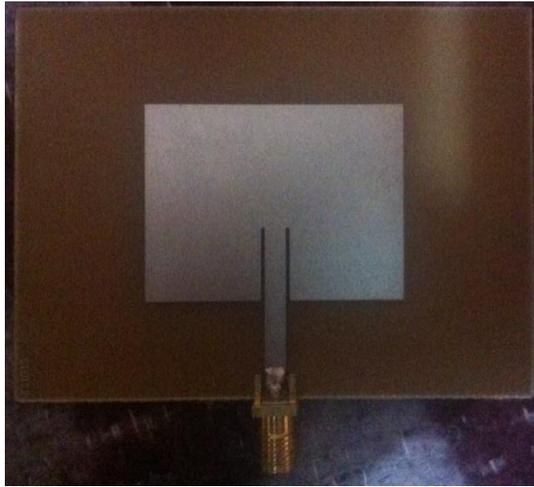
MATERIALES	CANTIDAD
FR4 de Doble Lado (1.5mm)	2
Conector SMA hembra con dieléctrico a 50 ohm	2
Conector SMA hembra con dieléctrico a 50 ohm para implementación en borde de circuito impreso	2
Pigtail rp-sma macho a rp-sma macho	4

Primero se necesita la impresión de los modelos elegidos sobre FR4, para lo cual se usa los archivos DXF propios de AutoCAD, en estos archivos se tiene los modelos con las dimensiones precisas de los parches y de las líneas de transmisión, de tal manera que no exista variación en las dimensiones de las líneas que puedan afectar seriamente el desempeño.

En la Figura 102 se muestra la implementación del parche rectangular a 2.4GHz en baquelita con sustrato FR4, se puede observar que tiene ya implementado el conector rp-sma que nos permitirá conectarlo a través de un Pigtail a un transmisor o router para pruebas en redes WLAN.

El conector rp-sma debe ser hembra para montaje en borde de placa ya que se lo instalara en el parche individual y debe tener una impedancia de 50 ohm para que no haya perdidas en el acople de impedancias y se tenga la mayor transferencia de energía.

En la siguiente figura se muestra la forma de la soldadura posterior del conector rp-sma hembra en el borde de la placa.



**a.) Antena tipo parche rectangular**



**b.) Soldadura posterior conector rp-sma hembra**



**c.) Conector rp-sma hembra**

**Figura 104. Implementación de prototipo de Antena tipo parche rectangular.**

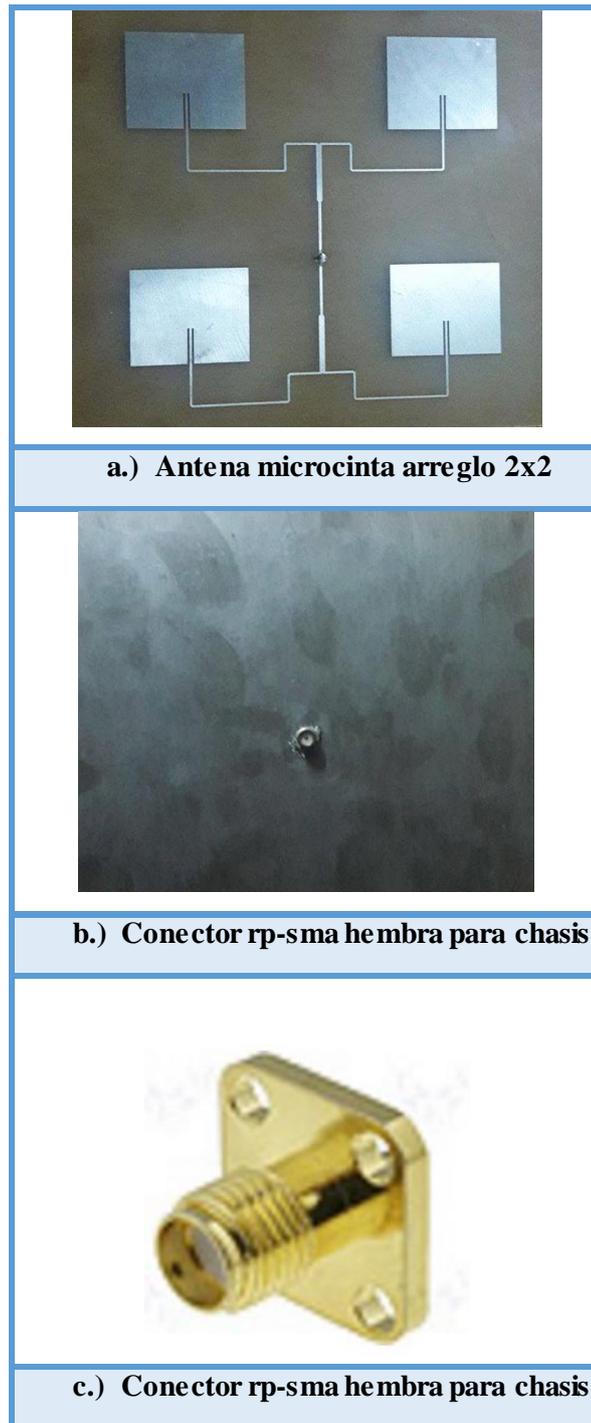
El Pigtail debe tener una impedancia igual al del conector para que no haya perdidas en el acople de impedancias y se tenga la mayor transferencia de energía, de un

extremo debe tener conector rp-sma macho para conectar a la antena y del otro extremo debe tener también conector rp-sma macho ya que el router Tp-Link posee conector rp-sma hembra para la conexión de antenas.



**Figura 105. Conexión de la antena al extremo del Pigtail.**

Para la implementación del arreglo 2x2 será de la misma forma que el parche individual, en la siguiente figura se muestra la imagen una vez ya ruteada en la baquelita, en esta implementación cambia la forma del conector ya que a diferencia del prototipo anterior ahora el conector no ira en el borde de la baquelita si no en el centro de ella, a este conector se lo denomina rp-sma hembra para chasis frontal de 4 tornillos, el cual deberá tener una impedancia de 50 ohm.



**Figura 106. Implementación de prototipo de Antena tipo parche arreglo 2x2.**

La instalación del conector va desde la parte posterior de la antena, introduciendo el pin del conector en un agujero hecho anteriormente hasta la parte frontal en donde está el diseño 2x2 y por último se procede a soldar tanto en la parte posterior como

en la frontal dejando conectado tanto el plano de tierra y la línea de transmisión de la antena frontal.

Instalado correctamente el conector se procederá a conectar la antena a un transmisor o router a través de un Pigtail de iguales condiciones que el del prototipo anterior es decir un pigtail de rp-sma macho a rp-sma macho como podemos observar en la siguiente figura.



**Figura 107. Conexión del pigtail al conector rp-sma de la antena 2x2.**

#### **5.4 PROTOTIPO DE ARREGLOS DE ANTENAS MIMO PARA PRUEBAS EN REDES WLAN**

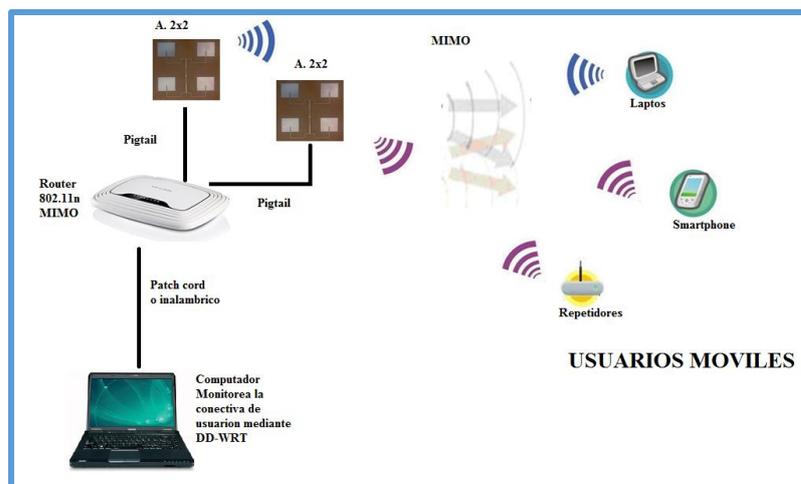
Para los propósitos del presente trabajo de realizar un prototipo de arreglo de antenas MIMO para pruebas en redes WLAN, las pruebas con el prototipo se basan en una red LAN inalámbrica conectando dos dispositivos de red, como son routers con estándar 802.11n (MIMO) que permitan enlaces MIMOS 2x2 es decir dos antenas en el transmisor, estos dos dispositivos estarán conectados inalámbricamente con los prototipos construidos y para verificar la conectividad se hará un ping entre los dos dispositivos verificando los siguientes valores:

- 1) SEÑAL DE POTENCIA RECIBIDA (DBM)

- 2) RUIDO (dB)
- 3) SNR (dB)
- 4) FRECUENCIA MHz
- 5) PROMEDIO DE LATENCIA (ms)
- 6) PAQUETES ENVIADOS EN TRANSMISIÓN PING
- 7) PAQUETES RECIBIDOS EN TRANSMISIÓN PING
- 8) PAQUETES PERDIDOS EN TRANSMISIÓN PING
- 9) CALIDAD DE SEÑAL (%)
- 10) ANCHO DE BANDA M\_POT\_AB

Para el prototipo y procedimiento de pruebas se lo implemento con un router marca Tp-Link, al cual se le instalo el software DD-WRT, el cual contiene herramientas de monitoreo de ancho de banda, sensibilidad de recepción, ruido, SNR e información de paquetes Wi-Fi.

En la siguiente figura se presenta el diagrama de conexión del prototipo de pruebas, como mencionamos anteriormente consiste en un router, el de la derecha como router de prueba, es decir, donde conectaremos la computadora en donde se verificara con ayuda de las herramientas antes mencionadas el funcionamiento de las antenas conectadas a los usuario móviles.



**Figura 108. Diagrama de conexión del prototipo de arreglo de antenas MIMO.**

La conexión de la laptop al router monitor se lo podrá hacer con un patch cord o mediante la señal Wi-Fi del router, en donde ingresaremos vía web a la configuración del mismo para poder utilizar las herramientas de potencia y ancho de banda, la medida de potencia recibida

La configuración de los router estará de la siguiente forma:

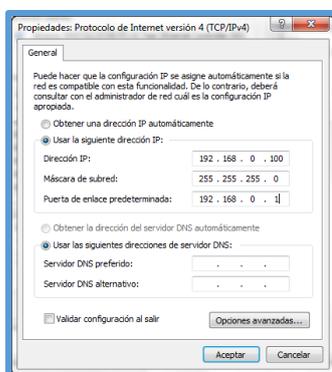
**Tabla 9. Configuración de cada router del Prototipo de Prueba**

<b>Router Monitor</b>
Nombre del router: M_POT_AB
Modo: AP
SSID inalámbrica: M_POT_AB
IP ROUTER: 192.168.0.1
Seguridad: DESACTIVADA
Potencia: 20dBm
Sensibilidad: -90dBm
MAC: C4:6E:1F:DE:29:9C

A continuación se presenta la interfaz del software DD-WRT y el proceso de pruebas de los prototipos implementados.

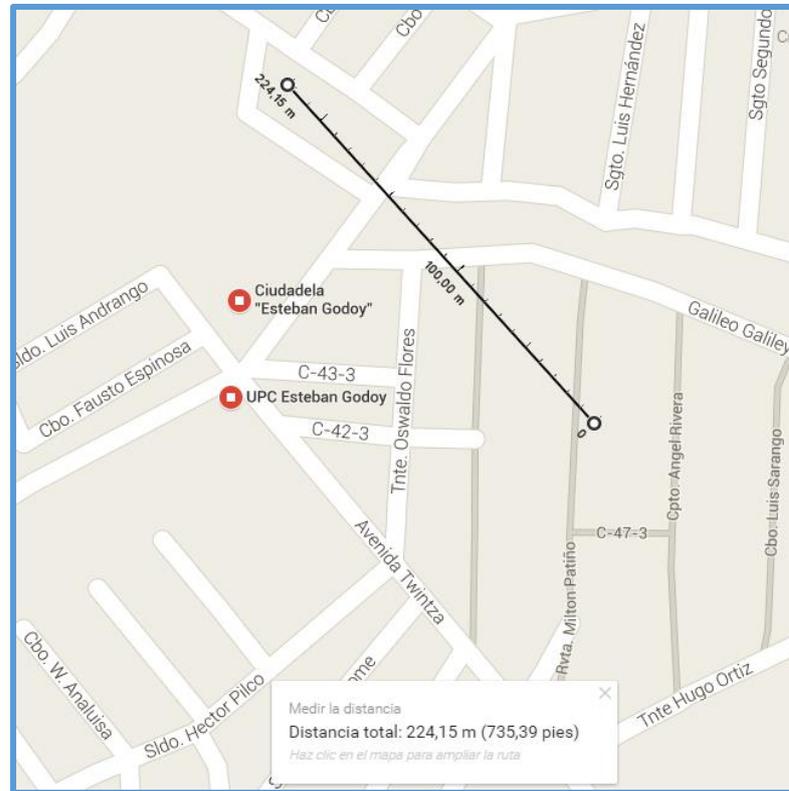
➤ **Lista de pasos del proceso de prueba.**

Conectar los prototipos implementados mediante el pigtail al router **M\_POT\_AB**.  
Conectar la computadora al router mediante un patch cord configurando la tarjeta de red de la computadora en la misma red que los routers.



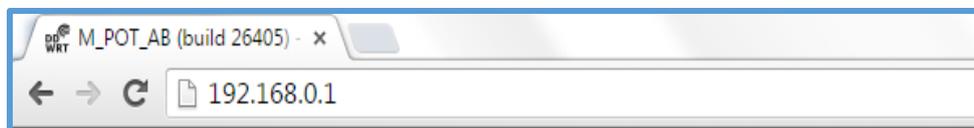
**Figura 109. Configuración de la tarjeta de red de la computadora conectada al router M\_POT\_AB.**

Alejar los routers una distancia considerable para realizar las pruebas pertinentes. Por ejemplo se puede distanciar las antenas 224 metros como se puede observar en la siguiente figura.



**Figura 110. Distancia y posición de los routers para las pruebas pertinentes.**

Abrir el explorador y escribir la IP del router M\_POT\_AB 192.168.0.1 de la siguiente forma:



**Figura 111. Ingreso de la IP del router M\_POT\_AB en el explorador.**

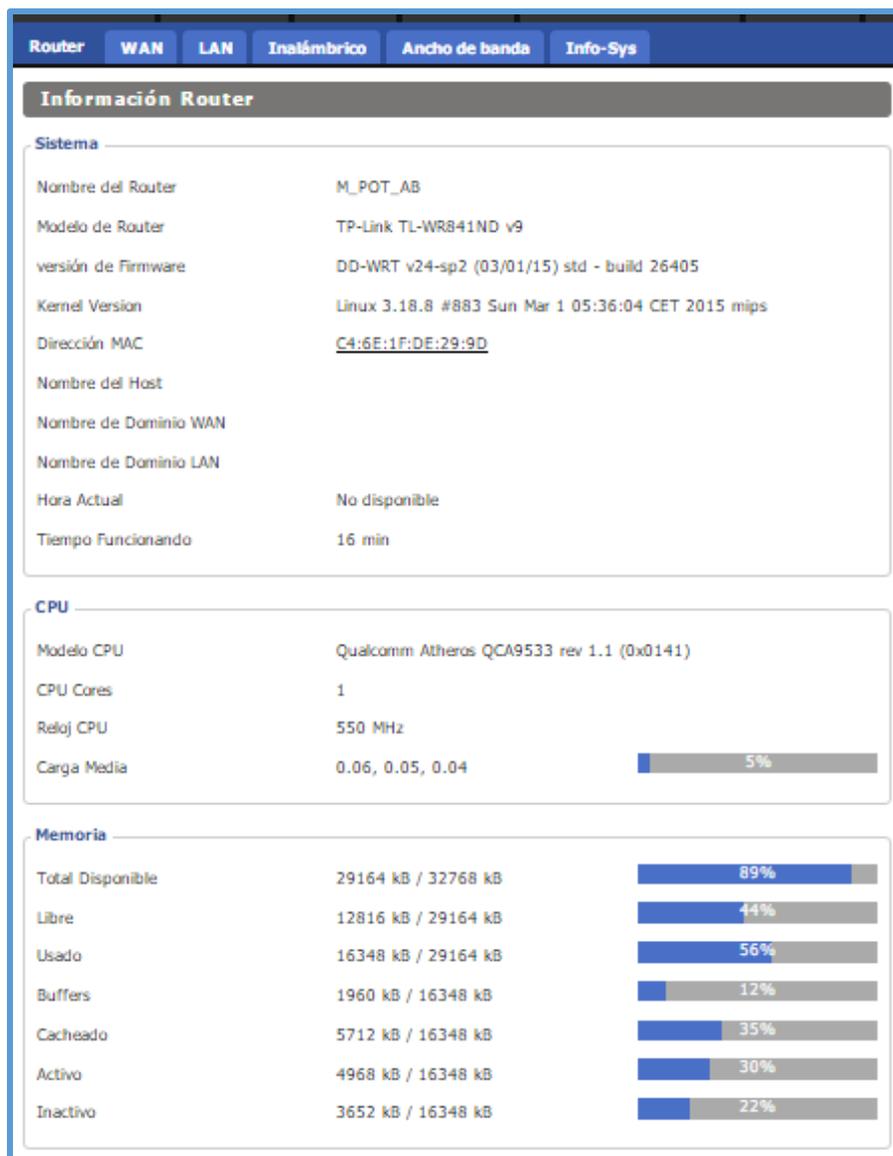
En donde se abrirá el software de configuración del router.

The screenshot displays the DD-WRT control panel interface. At the top, it shows the logo 'dd-wrt.com' and 'control panel'. The top right corner displays system statistics: 'Firmware: DD-WRT v24-sp2 (03/01/15) std', 'Hora: 01:09:01 up 9 min, load average: 0.01, 0.03, 0.04', and 'WAN IP: 0.0.0.0'. Below this is a navigation menu with tabs: 'Configuración', 'Inalámbrico', 'Servicios', 'Seguridad', 'Restricciones de Acceso', 'NAT / QoS', 'Administración', and 'Estado'. The main content area is titled 'Información de Sistema' and is divided into several sections:

- Router:**
  - Nombre del Router: M\_POT\_AB
  - Modelo de Router: TP-Link TL-WR841ND v9
  - LAN MAC: C4:6E:1F:DE:29:9C
  - WAN MAC: C4:6E:1F:DE:29:9D
  - MAC WIFI: C4:6E:1F:DE:29:9C
  - WAN IPv4: 0.0.0.0
  - LAN IP: 192.168.0.1
- Servicios:**
  - Servidor DHCP: Desactivado
  - WRT-radauth: Desactivado
  - Agente Sputnik: Desactivado
- Memoria:**
  - Total Disponible: 28.5 MB / 32.0 MB
  - Libre: 12.7 MB / 28.5 MB
  - Usado: 15.8 MB / 28.5 MB
  - Buffers: 1.9 MB / 15.8 MB
  - Cacheado: 5.4 MB / 15.8 MB
  - Activo: 4.5 MB / 15.8 MB
  - Inactivo: 3.8 MB / 15.8 MB
- Espacio Usado:**
  - NVRAM: 19.09 KB / 64 KB
- WIFI:**
  - Radio: El adaptador está encendido
  - Modo: AP
  - Red: Sólo-N (2.4 GHz)
  - SSID: M\_POT\_AB
  - Canal: 6 (2437 MHz)
  - Potencia TX: 20 dBm
  - Tasa: 144.444 Mb/s
- Info. Paquetes WIFI:**
  - Recibidos (RX): 0 OK, no error
  - Transmitidos (TX): 514 OK, no error

**Figura 112. Interfaz del software DD-WRT implementado en los routers.**

Como observamos en la figura 110 la interfaz tiene todas las configuraciones básicas de un router, pero las herramientas que nos ayudaran a realizar las pruebas están en la pestaña “Estado” el cual está en la parte superior derecha al picar esta pestaña se presentara lo siguiente:



**Figura 113. Información de software y hardware del router con interfaz DD-WRT.**

En la figura 111 se presenta toda la información del router y lo más importante cinco pestañas, en donde nuestras herramientas a utilizar serán “Inalámbrico” y “ancho de banda”, empezamos picando en Inalámbrico ya que estamos probando el funcionamiento de antenas en redes WLAN.



**Figura 114. Interfaz de la herramienta Inalámbrico.**

Esta herramienta como observamos nos permitirá tener información de suma importancia en las pruebas de los prototipos implementados, ya que se puede observar el canal de transmisión es decir en la frecuencia que está trabajando la antena, potencia que ofrece el router hacia las antenas y la tasa de transmisión, toda esta información se denomina estado Wi-Fi.

Seguido la información de Paquetes Wi-Fi lo cual es un ping constante entre los dos routers y cuyos valores sirven para calcular la tasa de transmisión.

En la parte inferior de la interfaz se encuentran los clientes Wi-Fi es decir todos los equipos que estén conectados al router M\_POT\_AB. En la parte sombreada por el círculo amarillo los usuarios móviles se identificara por su dirección MAC, y como

podemos observar recibiremos información de señal de potencia recibida, ruido, SNR, calidad de señal y tasa de transmisión lo cual servirá para discutir la factibilidad de la implementación y funcionamiento de acuerdo a los valores de ganancia, directividad, frecuencia de trabajo y eficiencia.

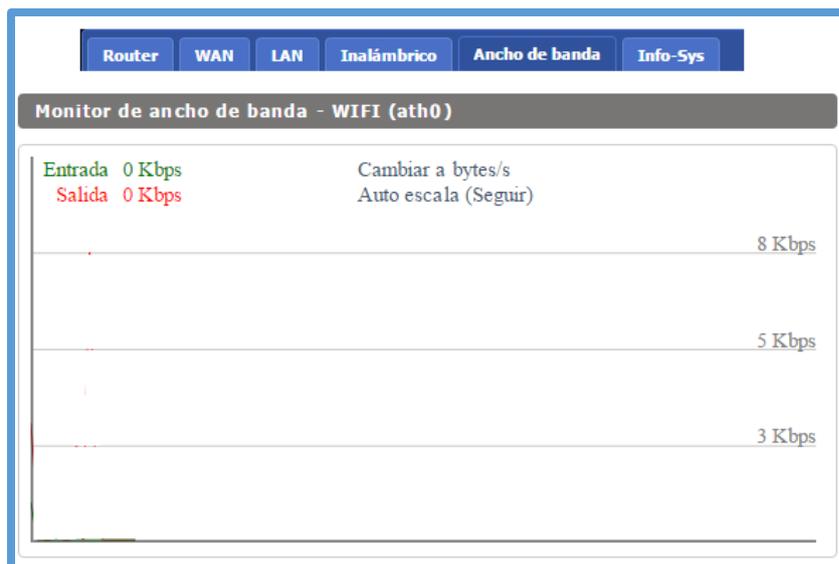
Al final de la figura 112 observamos dos pestañas (Inspección de Sitios y Wiviz survey) los dos realizan la misma función de listar todos los dispositivos inalámbricos dentro de rango de sensibilidad del router, esto nos servirá para constatar la presencia de la red emitida de la antena conectada al router de prueba de antenas y el Wiviz survey tiene animación de la posición de los dispositivos lo cual solo hace más amigable la lectura de información.



**Figura 115. Interfaz de la pestaña Inspección de Sitios.**

Observando la figura 115 comprobamos que esta herramienta nos permite verificar la misma información que el bloque anterior Clientes Wi-Fi añadiendo el nombre de la red inalámbrica, la frecuencia de trabajo y también permite conectarse los dispositivos listados si requerimos verificar su funcionamiento inalámbrico.

Explicado todo lo concerniente a la herramienta Inalámbrico se continúa con la herramienta Ancho de banda si la picamos nos presenta lo siguiente:



**Figura 116. Presentación de la herramienta Ancho de Banda y sus Monitores.**

Se puede constatar en la figura 116 que la herramienta nos proporciona cuatro diferentes tipos de monitores, pero el que es de pertinencia para nuestras pruebas será el último, el enfocado a transmisión inalámbrica, Monitor de Ancho de Banda Wi-Fi. Para tener un buen funcionamiento en cuestión de ancho de banda se tendrá que tener valores iguales tanto en entrada como en salida.

Para empezar a recibir y transmitir paquetes se hará un ping a los dispositivos móviles conectados a la red.

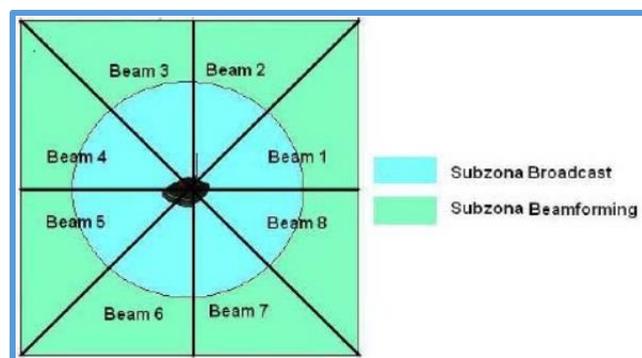
## **5.5 ALGORITMOS ADAPTABLES PARA ARREGLOS DE ANTENAS MIMO**

A medida que transcurre la existencia de las redes inalámbricas los usuarios potencian su demanda en incremento de capacidad de las redes, esto se logró con la creación de antenas inteligentes que es la unión de un arreglo de antenas MIMO y un dispositivo DSP explotando el espacio de manera selectiva. [50]

Una antena inteligente optimiza los diagramas de radiación tanto en transmisión como en recepción en respuesta a una señal específica del usuario. Es decir que los sistemas de antenas inteligentes no tienen diagramas de radiación fijos, a lo

contrario son capaces de generar y seleccionar haces muy directivos adaptándolos a las condiciones radioeléctricas de cada momento enfocados hacia el usuario deseado. [50]

Las antenas inteligentes por su ventaja de variar a conveniencia su diagrama de radiación pueden trabajar de dos modos distintos, tanto como antena omnidireccional teniendo un rango de alcance llamado subzona Broadcast y modo direccional donde posee una cobertura llamada subzona Beamforming la cual está dividida en beams, que se define como el rango de alcance de la antena en modo direccional para un cierto ángulo de apertura. [19]



**Figura 117. Tipos de alcances de las Antenas Inteligentes. [50]**

Los sistemas de antenas inteligentes proporcionaron oportunidades para incrementar la capacidad del sistema de redes inalámbricas, proporcionando calidad de servicio, control de potencia a partir de la creación de algoritmos adaptables que aplicados y configurados correctamente lograrían optimizar el sistema de redes inalámbricas.

Los sistemas de antenas inteligentes se clasifican en tres tipos: [50]

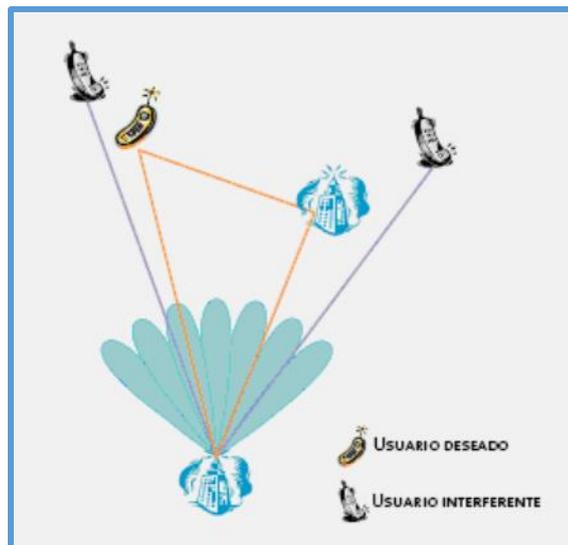
### **5.5.1 Haz Conmutado.**

El funcionamiento del algoritmo es el siguiente, en cada posición del haz se verifica la existencia de una posible señal, en caso afirmativo, el sistema guarda información

de la posición del haz, ángulo de apertura e identificativo del usuario y se genera la comunicación con el usuario por un determinado lapso de tiempo.

- Configuración más simple de antenas para implementar e instalar.
- Genera varios haces a ángulos prefijados.
- Conmuta todos sus haces secuencialmente.
- Hace un barrido discreto de la zona de cobertura en posiciones angulares fijas.

Luego del lapso de tiempo se conmuta al siguiente haz con otro apertura para detectar la posible existencia de otros usuarios en todos los haces restantes hasta llegar al límite de la zona de cobertura. Este proceso se repite continuamente en el tiempo. [50]



**Figura 118. Haz Conmutado. [19]**

Las principales desventajas del uso de esta técnica son: [50]

- No se garantiza que el dispositivo móvil se encuentre en la dirección del lóbulo principal.

- Las señales interferentes no son reducidas de forma clara, es posible que alguna ingrese por algún lóbulo secundario.

### 5.5.2 Haz de Seguimiento

El algoritmo de esta técnica tiende a ser más complejo en su funcionamiento y costoso, esta técnica requiere el uso de un array progresivo, es decir un arreglo en donde se tiene la posibilidad de controlar las fases con las que se alimentan a cada uno de los elementos del arreglo de antenas, lo que permite el control electrónico generando el poder de modificar a voluntad la dirección en la que apunta el lóbulo principal del diagrama de radiación de todo el arreglo apuntando y estableciendo la conexión con el usuario respectivo. [19]

En palabras sencillas si el usuario se mueve el diagrama de radiación seguirá la trayectoria del usuario apuntándolo con el lóbulo principal, para que esto sea posible el haz de seguimiento necesita utilizar un algoritmo de detección de la dirección de llegada (DoA) para que el diagrama de radiación pueda reorientarse de manera dinámica, apuntando la dirección del haz al usuario deseado. [50]

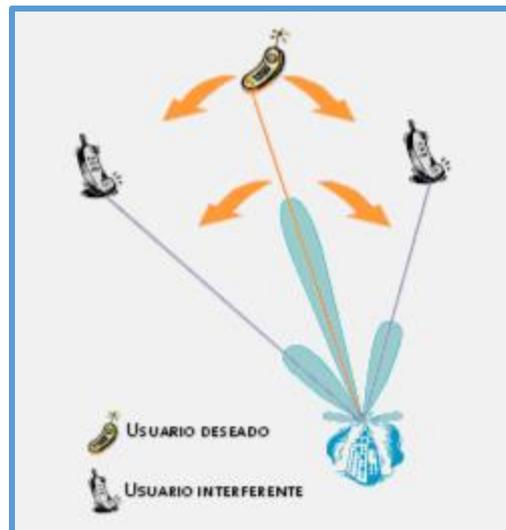


Figura 119. Haz de seguimiento. [19]

Este algoritmo asegura que el usuario va a estar siempre apuntado por el haz principal con la máxima ganancia. La principal desventaja de esta técnica es que no puede evitar que las interferencias entren por algún lóbulo secundario del diagrama de radiación. [19]

### 5.5.3 Haz Adaptativo

Este algoritmo permite ofrecer a un arreglo de antenas el máximo de inteligencia posible, ya que el sistema es capaz de optimizar el diagrama de radiación en tiempo real, adaptándose al entorno eliminando interferencias, mejorando el SNR y orientando el haz principal a un usuario móvil.

En este sistema, las salidas de cada elemento del arreglo de antenas se ponderan con un factor de peso cuyo valor se asigna dinámicamente para conformar un diagrama de radiación que presente el haz principal hacia la posición del usuario deseado y los haces o lóbulos secundarios hacia las direcciones de las componentes de multitrayecto de la señal deseada y los nulos de radiación en las direcciones de las fuentes de interferencia. [50]

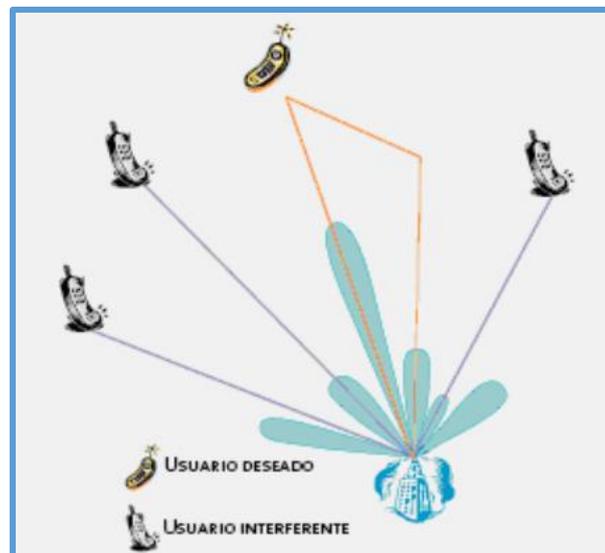
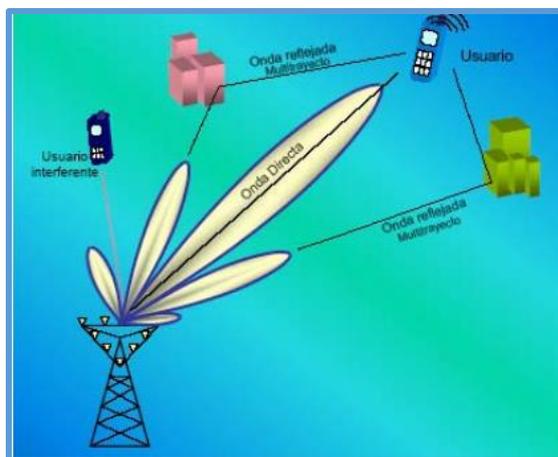


Figura 120. Haz Adaptativo. [19]

Una de las principales ventajas del algoritmo haz adaptable es eliminar las interferencias, esto lo logra con complicados algoritmos de procesamiento adaptable (DSP), dando los pesos a las salidas de cada elemento del arreglo para que proporcionen la mínima potencia de la señal de salida, en otras palabras los pesos son atenuadores y desfasadores en la parte transmisora. Una vez programado dinámicamente los pesos en las salidas, el diagrama de radiación generará nulos en las direcciones de las interferencias, esto se actualizará en tiempo real para que los nulos sigan y apunten en la dirección de las interferencias. [19]



**Figura 121. Haz directo y lóbulos secundarios por multitrayecto. [50]**

## **5.6 ELECCIÓN DEL ALGORITMO ADAPTABLE ÓPTIMO PARA ARREGLOS DE ANTENAS EN REDES WLAN.**

En la sección anterior ya se describió las especificaciones y funcionamiento de cada técnica, ahora ya es posible hacer una elección correcta para el funcionamiento de arreglos de antenas en redes WLAN.

Empezando con la etapa de la elección, de forma rápida se puede concluir que la técnica más óptima sería la de haz adaptable pero antes se debe efectuar una comparación con las otras dos técnicas.

Identificando las ventajas de la técnica de haz conmutado tenemos que hace un barrido en todo el rango de su cobertura mediante distintos ángulos de apertura,

buscando usuarios móviles. La desventaja de esta técnica es que los ángulos de las aperturas son fijos y puede darse ocasiones en las que los usuarios no estén en el ángulo de apertura es decir los usuarios no todo el tiempo estarán apuntados por el haz principal, por otro lado los lóbulos secundarios podrían recibir interferencias y no utilizan la técnica de multitrayecto para optimizar el medio y recursos del sistema.

En cambio la técnica de haz de seguimiento posee mejores ventajas que la anterior ya que tiene mejor resolución en los ángulos de apertura lo que permite apuntar al usuario móvil todo el tiempo, es decir, lo sigue hasta que salga de la zona de cobertura y cambie de AP. La desventaja de esta técnica es que genera lóbulos secundarios por donde pueden ingresar las interferencias, por otro lado esta técnica tampoco utiliza el multitrayecto.

La técnica de haz adaptativo es una combinación de las técnicas anteriores mejorando las desventajas que presentaban y optimizando el medio y el sistema. Las ventajas o fortalezas de la técnica de haz adaptativo es poseer un diagrama de radiación que cambia dependiendo de la posición del usuario móvil apuntándolo todo el tiempo con el haz principal teniendo excelente ganancia y adaptándose al entorno radioeléctrico. Otra ventaja es utilizar los lóbulos secundarios para generar multitrayecto al usuario y generar nulos en el diagrama de radiación que detectan las interferencias y no permiten que entren por medio de los lóbulos secundarios.

La desventajas que presenta el algoritmo de haz adaptativo es efecto de todo lo que realiza en sí, es decir esta técnica requiere un procesado de información eficaz lo que requiere un DSP muy potente por la complejidad del sistema.

Comparando a nivel de ventajas y desventajas las tres técnicas de algoritmos adaptables para arreglos de antenas en redes WLAN, se puede notar muy claramente que la técnica de haz adaptativo es muy superior a las demás tanto en funcionalidad y eficacia pero posee una desventaja de requerimiento físico de un potente DSP por lo que solo se instala en los AP.

El algoritmo de haz adaptable es el más óptimo para funcionar en arreglos de antenas para pruebas en redes WLAN ya que lleva el nivel de inteligencia de una antena a un nivel muy superior mejorando el nivel de recepción de potencia en los usuarios móviles. Se puede resumir la técnica de haz adaptable en las siguientes características:

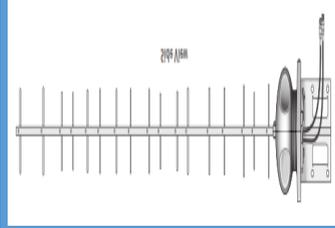
- Reducción de la potencia de transmisión.
- Reducción del nivel de interferencia.
- Incremento del nivel de seguridad.
- Incremento de la zona de cobertura.
- Mejora de la eficiencia espectral.

## **6. RESULTADOS**

## 6.1 CUADRO COMPARATIVO DE LAS LIMITACIONES DE ANTENAS PARA REDES WLAN.

En el siguiente cuadro se listan las limitaciones de los tres tipos de antenas para redes WLAN que se analizaron.

**Tabla 10. Limitaciones de tres tipos de antenas para redes WLAN.**

Yagui - Uda	Parabólica Grilla	Panel Microstrip
		
<b>Limitaciones</b>		
<b>Diseño</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para mejorar el ancho de banda se complica la forma física del diseño.</li> <li>• Si se mejoran los parámetros aumenta el tamaño físico.</li> <li>• Dificultad de miniaturización y mimetización por su principio de funcionamiento y análisis.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere diseño de elementos múltiples para lograr alta ganancia y direccionalidad.</li> <li>• Ancho de haz muy angosto.</li> <li>• Para mejorar las características se tendría que aumentar tamaño.</li> <li>• La limitación de tener un ancho de haz muy angosto es de poseer poca cobertura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencia en las líneas de microcinta entre 5 y 8 watt a diferencia de las antenas Yagi y Grilla que soportan potencias de 50 a 100 watt.</li> <li>• Ancho de banda entre 2 a 5%.</li> <li>• Para mejorar ancho de banda se debe aumentar el grosor del sustrato.</li> </ul>
<b>Físicas</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nivel de direccionalidad medio.</li> <li>• Necesita soportes metálicos para sujetarlas.</li> <li>• Dificultad de instalación en cualquier tipo de superficie.</li> <li>• No posee característica de integración con el dispositivo transmisor.</li> <li>• Dificultad de miniaturización y mimetización ya que siempre son visibles al ojo humano.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En enlaces punto a punto las antenas deben estar perfectamente direccionadas para lograr la comunicación.</li> <li>• Mayor tamaño y peso en comparación con las antenas Yagi.</li> <li>• No son posibles características de mimetización y miniaturización.</li> <li>• No vienen integradas al dispositivo transmisor.</li> <li>• Su instalación no puede efectuarse en cualquier superficie se debe hacerlo en lugares adecuados y óptimos.</li> <li>• Tediosa instalación ya que las antenas Grilla vienen en dos partes las cuales deben armarse y sujetarse con implementos mecánicos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácilmente afectadas por el factor térmico sobre todo si se trabaja con sustratos muy delgados.</li> </ul>
<b>Aplicaciones</b>		

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ancho de haz para enlaces punto a punto.</li> <li>• Utilizadas frecuentemente para recepción de TV.</li> <li>• En redes WLAN solo aplicaciones Outdoor.</li> <li>• No es posible instalarlas en oficinas para acceso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solo aplicaciones de enlaces punto a punto a largas distancias.</li> <li>• En aplicaciones a redes WLAN solo se la utilizaría como puente entre dos routers o como parte del CPE enlazado a la celda del ISP o lo contrario podría estar en el ISP pero jamás como acceso de usuarios.</li> </ul>	<p><b>No hay limitaciones relevantes.</b></p>
---	--	---

## 6.2 ESPECIFICACIONES DEL TIPO DE ARREGLO DE ANTENAS ÓPTIMO PARA REDES WLAN.

Se presenta las principales ventajas, desventajas y aplicaciones del tipo de antena más óptimo para redes WLAN tras la elección, tomando en cuenta sus limitaciones para la aplicación deseada.

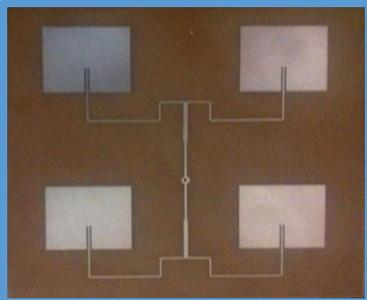
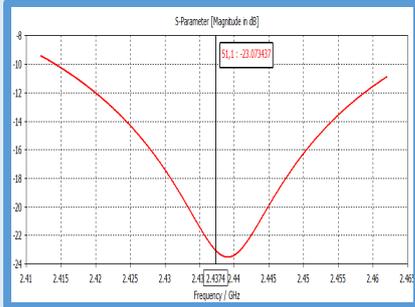
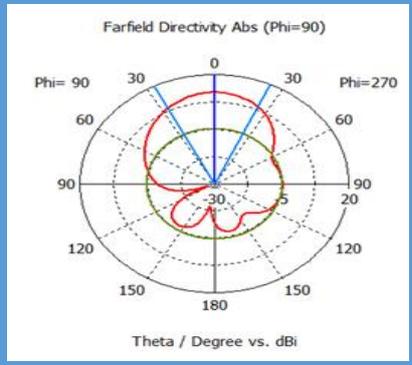
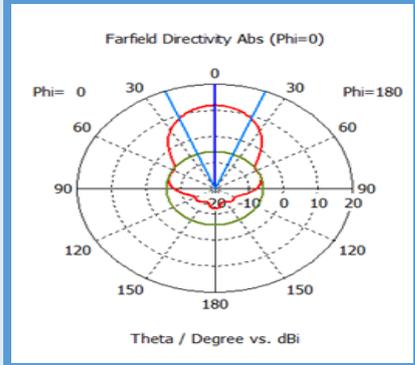
**Tabla 11. Especificaciones de las antenas Microstrip.**

Antenas Microstrip		
Ventajas	Desventajas	Aplicaciones WLAN
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilidad para integrar elementos activos en el sustrato.</li> <li>• Livianas y ocupan poco espacio.</li> <li>• Fáciles de adaptar a distintas superficies, por su perfil plano.</li> <li>• Bajos costos de fabricación y facilidad de réplicas.</li> <li>• Polarización lineal y circular.</li> <li>• Se vuelven robustas al montarlas en superficies rígidas.</li> <li>• Utilizables sin necesidad de largos y complicados cálculos.</li> <li>• No requieren estructura de soporte.</li> <li>• Pueden ser omnidireccionales o direccionales dependiendo del arreglo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pequeño ancho de banda.</li> <li>• Manejo de baja potencia.</li> <li>• La radiación de los bordes puede afectar a los parámetros de la antena.</li> <li>• Fácilmente afectadas por el factor térmico sobre todo si se trabaja con sustratos muy delgados.</li> <li>• Pérdidas óhmicas en los conectores de alimentación en arreglos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enlaces punto a punto.</li> <li>• Aplicaciones Indoor dentro de oficinas para acceso.</li> <li>• Parte del equipo CPE.</li> <li>• Comunicaciones móviles.</li> <li>• Aeronáutica.</li> <li>• Retransmisión de tv en directo.</li> <li>• Náutica.</li> <li>• Biomédicas.</li> <li>• Telemetría.</li> <li>• Observación de la tierra.</li> <li>• Sistemas de vigilancia.</li> </ul>

### 6.3 RESULTADOS DEL DISEÑO DE ANTENAS MICROCINTA EN ARREGLO 2X2.

Se procedió a realizar el diseño del tipo de antena seleccionada, la cual es antena microstrip, se diseñó un arreglo 2x2 en sustrato FR4 a una frecuencia de resonancia de 2.437 GHz, se presenta un tipo de datasheet del arreglo.

**Tabla 12. Datasheet del arreglo microstrip 2x2 a 2.437 GHz.**

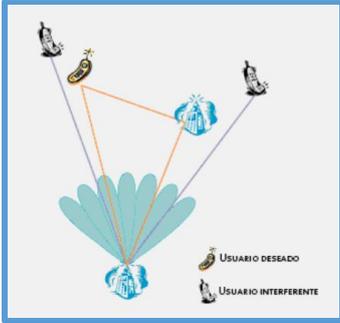
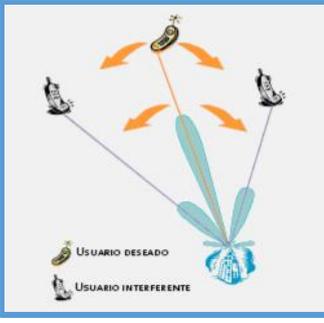
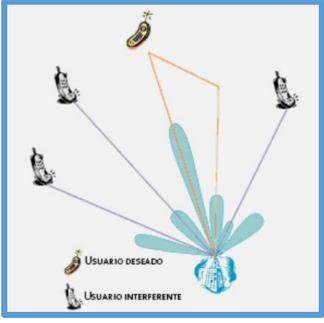
Arreglo microstrip 2x2	
	
<b>Frecuencia de Resonancia</b>	<b>Diagrama de Radiación</b>
	
<b>Parámetros</b>	<b>Simulación CST</b>
Frecuencia	<b>2.437 GHz</b>
Impedancia	<b>50 ohm</b>
Ganancia	<b>11.8 dBi</b>
AB	<b>2%</b>
ROE	<b>1.1:2</b>
Ancho de Haz a -3dB	<b>V:42.5° – H:50.9°</b>
Dimensión del arreglo	<b>2x2</b>
Tipo de conector	<b>rpsma hembra</b>

El arreglo diseñado se lo implementara en un dispositivo WLAN de marca Tp-link, el cual trabaja bajo el estándar 802.11n que posee la tecnología MIMO, por lo tanto físicamente permite la instalación de dos antenas. Obviamente se construyeron dos arreglos iguales.

#### 6.4 COMPARATIVO DE LOS ALGORITMOS ADAPTABLES PARA REDES WLAN.

Tras analizar las tres técnicas de antenas inteligentes (Haz conmutado, Haz adaptable y Haz de seguimiento) se realizó un cuadro comparativo de las principales especificaciones que permitieron discernir cual algoritmo es más óptimo para destacar dentro de las redes WLAN. En cuestión de funcionalidad y eficacia se destacó la técnica de Haz Adaptativo principalmente por su algoritmo que elimina las interferencias.

**Tabla 13. Comparación de los algoritmos para las técnicas de Antenas Inteligentes.**

Haz Conmutado	Haz de Seguimiento	Haz Adaptativo
		
<p>Las ventajas de la técnica de haz conmutado tenemos que hace un barrido en todo el rango de su cobertura mediante distintos ángulos de apertura, buscando usuarios móviles. La desventaja de esta técnica es que los ángulos de las aperturas son fijos y puede darse ocasiones en las que los usuarios no estén en el ángulo de apertura es decir los usuarios no todo el tiempo estarán apuntados por el haz principal, por otro lado los lóbulos secundarios podrían recibir interferencias y no utilizan la técnica de multitrayecto para</p>	<p>La técnica de haz de seguimiento posee mejores ventajas que la anterior ya que tiene mejor resolución en los ángulos de apertura lo que permite apuntar al usuario móvil todo el tiempo, es decir, lo sigue hasta que salga de la zona de cobertura y cambie de AP. La desventaja de esta técnica es que genera lóbulos secundarios por donde pueden ingresar las interferencias, por</p>	<p>La técnica de haz adaptativo es una combinación de las técnicas anteriores mejorando las desventajas que presentaban y optimizando el medio y el sistema. Las ventajas o fortalezas de la técnica de haz adaptativo es poseer un diagrama de radiación que cambia dependiendo de la posición del usuario móvil apuntándolo todo el tiempo con el haz principal teniendo excelente ganancia y adaptándose al entorno radioeléctrico. Otra ventaja es utilizar los lóbulos secundarios para generar multitrayecto al</p>

optimizar el medio y recursos del sistema.	otro lado esta técnica tampoco utiliza el multitrayecto.	usuario y generar nulos en el diagrama de radiación que detectan las interferencias y no permiten que entren por medio de los lóbulos secundarios.
--	--	--

## 7. DISCUSIÓN

En los objetivos de este trabajo de investigación constaba la búsqueda de las limitaciones de las antenas actuales para redes WLAN. Entre las antenas actuales más utilizadas tenemos antenas Yagi, Grillada y Microstrip, en las cuales se analizó el principio básico de su funcionamiento y datasheet de las distintas marcas, en el caso de las antenas Yagi los datasheet fueron de la marca SLANPRO y airMax, para las antenas Grilladas Tp-link e Hyperlink, por ultimo para las antenas Microstrip se analizaron datasheet de la marca NanoStation.

Las limitaciones de los tres tipos de antenas que se muestran en la tabla 10, se dedujeron basando su aplicación en redes WLAN, tanto en ambiente Indoor y Outdoor, lo que dejó en desventajas a las antenas Yagi y Grilladas, ya que su principal uso es en transmisiones punto a punto por su ancho de haz y ganancia.

- Yagi LANPRO LP-YAGI2415N: ganancia (15dBi), ancho de haz (V: 28 H: 30)
- Antena airMax 900MHz YAGI: ganancia (16dBi), ancho de haz (V: 34 H: 34)
- Grilla Tp-Link TL-ANT2424B: ganancia (24dBi), ancho de haz (V: 14 H: 10)
- Mini-Reflector Grid LA HG2415G: ganancia (15dBi), ancho de haz (V: 21 H: 16)
- NanoStationM Indoor/Outdoor airMAXCPE: ganancia (7 a 14dBi), ancho de haz (V: 41 a 60 H: 41 a 60)

En el caso de las antenas Yagi y Grilladas por los datos de ancho de haz tenemos la principal limitación en ambientes Indoor para acceso, por no tener amplia cobertura como si la tiene las antenas NanoStation teniendo también variantes muy directivas para enlaces punto a punto, y con ancho de haz muy superior que las antenas Yagui y Grilladas.

Otra limitación para ambientes Indoor de parte de las antenas fue su tamaño, siendo las antenas Yagui y Grillas las más afectadas por su composición física lo que las hace más aptas para ambientes Outdoor como repetidores o enlazarse a la celda del

ISP, estas antenas por su peso necesitan soportes metálicos para fijarlas a la superficie de instalación, lo que da a relucir otra limitación, la cual es que no es posible fijarlas en cualquier superficie.

Por otro lado las antenas Microstrip NanoStation son de composición física sólida y reducida de forma plana, lo cual permite instalarlas en cualquier superficie y ambiente sea Indoor u Outdoor.

En cuestión de limitaciones referentes al diseño, las tres antenas poseen limitaciones ya que para mejorar los parámetros de ganancia y ancho de banda se tendrá que aumentar el tamaño de su constitución física, en caso de la antena Yagui para mayor ganancia mayor número de directores y reflectores además de complicando la forma del dipolo, en la antena Grilla incremento del reflector parabólico grillado, en las antenas microstrip para elevar la ganancia aumenta el número de parches en el arreglo y amento del grosor del sustrato si se desea aumentar el ancho de banda.

Por estas limitaciones se puede deducir que las antenas Yagi y Grilla no tienen la capacidad de mimetización e inclusión con el dispositivo transmisor, lo cual si es una óptima y excelente ventaja para las antenas Microstrip.

Por lo discutido se puede deducir que las antenas Yagi y Grillas poseen más limitaciones que las antenas Microstrip, pero en cuestión de ancho de banda y potencia, las antenas Microstrip sufren las principales limitaciones, ya que el ancho de banda de estas antenas se encuentra entre 2% y 5% y para mejorarlo se tendría aumentar el grosor del sustrato.

El segundo objetivo del proyecto fue elegir un tipo de antena óptimo para el prototipo de pruebas en redes WLAN para lo cual el primer objetivo fue muy importante para elegir el tipo de antena.

Esta notablemente claro que las antenas Microstrip poseen menos limitaciones dentro de las redes WLAN las cuales no afectan significativamente su funcionamiento.

Otro aspecto importante de la elección de las antenas Microstrip es su versatilidad para el diseño. Su diseño se basa en la elección de la frecuencia de resonancia, sustrato e impedancia de entrada la cual es muy importante ya que en cuestión de conectores de alimentación a la antena solo existen de 50 y 75 ohm.

Mediante la agrupación de estos parches se puede moldear un diagrama de radiación, en base a ganancia, ancho de haz, cobertura. Es decir pueden ser omnidireccional, sectorial o directiva como se lo pudo constatar en los datasheet de la marca NanoStation.

Para el prototipo se diseñó un arreglo 2x2 de 4 parches a una frecuencia de 2,437 GHz con una impedancia de entrada de 50 ohm, la cual se alimenta de manera coaxial con un conector rpsma hembra.

Los datos y resultados del diseño en simulación se encuentran en la tabla 12 los cuales son óptimos para implementación y funcionamiento en una red WLAN. Ya que en simulación en Cst Microwave se obtuvieron parámetros óptimos como son diagrama de radiación con un lóbulo principal de 11.8 dB y 50.9° de ancho de haz a -3dB, teniendo cobertura para acceso en interiores y suficiente ganancia para aplicaciones punto a punto.

El ancho de banda se encuentra en un 2% lo suficiente para abarcar los 11 canales de la banda de 2,437 GHz. Además posee un ROE de 1.1 lo que indica que las pérdidas por retorno son muy bajas y posee una aceptable calidad de transmisión.

El prototipo de arreglos de antenas MIMO para pruebas en redes WLAN finaliza con la inclusión del dispositivo transmisor (Router TP-LINK) el cual trabaja con el estándar 802.11n que trabaja con tecnología MIMO, es decir se puede conectar más

de una antena, en este caso serían dos antenas, este dispositivo posee conectores rpsma hembra para conectar antenas, por lo que nuestros diseños se acoplaran mediante un pigtail. Se justifica el dispositivo ya que va acorde a los requisitos de los arreglos 2x2 implementados y del fin de funcionamiento del prototipo.

El último objetivo del proyecto de investigación fue elegir un algoritmo adaptable que pudiera dar mayor inteligencia a los AP en una red WLAN para mejorar la conectividad y capacidad de la red.

Dentro de la investigación se conoció el término antenas inteligentes que en resumen es la unión de arreglos de antenas MIMO, procesador de información y algoritmos (DSP).

Es posible tres técnicas: Haz conmutado, Haz de seguimiento y Haz adaptativo, en la tabla 13 se puede analizar sus principales características, que se basan en la forma en que se conectan con los usuarios y eliminan las interferencias.

Entre estas tres técnicas resalta el algoritmo de Haz adaptativo, aunque conlleva mayor complejidad, las ventajas y herramientas que posee son superiores, ya que mantiene constantemente conectado al usuario teniendo la facilidad de moverse en todo el rango de cobertura, crea caminos secundarios de conectividad por la técnica de multirayecto a través de los lóbulos secundarios y elimina las interferencias creando nulos en el patrón de radiación en dirección de las mismas.

La técnica de Haz adaptativo es la más óptima para redes WLAN por su algoritmos de funcionamiento a consecuencia de su complejidad y costo de aplicación.

## **8. CONCLUSIONES**

Una vez concluido los objetivos del presente proyecto de investigación y según los resultados que se obtuvieron se tienen las siguientes conclusiones:

- Las limitaciones de cada tipo de antena dependen de la aplicación a la que será sometida, ya que una limitación en redes WLAN puede ser una ventaja en cualquier otra aplicación.
- Las principales bases para encontrar limitaciones en una antena son los parámetros de ancho de haz, forma física, ganancia, cobertura, ancho de banda, mimetización, miniaturización, integración con el dispositivo transmisor y facilidad de instalación.
- Al momento de discernir limitaciones para implementar antenas en redes WLAN es de suma ayuda basar el análisis en los datasheet de las antenas y el funcionamiento básico de manera que se tiene una idea clara del funcionamiento de la antena.
- Actualmente se incrementó la demanda de antenas para WLAN, en donde los requisitos prioritarios son que sean compactas, de bajo perfil, directivas y sectoriales, con un diseño discreto. Debido a estas características, las antenas Microstrip son la opción más adecuada para aplicaciones inalámbricas.
- Las antenas Microstrip son la elección más apropiada para satisfacer los requisitos claves de las redes WLAN en entornos Indoor, por su invisibilidad para el usuario, ocupación de espacio reducido y la posibilidad de que pueden diseñarse antenas de tal forma que se mimeticen con el entorno, además de también poseer características que satisfacen los entornos Outdoor para funcionar como puentes o enlazarse a la celda del ISP ya que también puede ser muy directivas como se notó en los datasheet de la marca NanoStation.

- La técnica de línea de transmisión para el diseño de parche microstrip rectangular, dio resultados muy confiables a las especificaciones de diseño, pero se necesita ajustar las longitudes calculados por éste método, y se hace uso del proceso de optimización, cuyo objetivo es variar las dimensiones del parche, hasta lograr valores óptimos en sus parámetros de trabajo. Por ende si se cambia la longitud del parche, éste responde de forma inversamente proporcional, es decir, si se quiere aumentar la frecuencia de resonancia se deberá disminuir la longitud o viceversa.
- Al agrupar parches en un arreglo 2x2, el diagrama de radiación se vuelve más directivo, es decir que la radiación que aporta cada uno de los parches, se concentra en una sola dirección, La separación de los parches tanto en el plano eléctrico como en el plano magnético influye en los parámetros de ganancia y directividad de todo el arreglo, por ello se debe elegir una distancia acorde a un patrón de radiación eficiente, que minimice el nivel de lóbulos laterales y a su vez mantenga un buen nivel de ganancia.
- El prototipo de arreglo de antenas MIMO para pruebas en redes WLAN es factible porque el dispositivo transmisor utilizado trabaja bajo el estándar 802.11n el cual posee tecnología MIMO y permite instalar dos antenas por su técnica de multitrayecto explicada en la sección de tecnología MIMO.
- La fortaleza de las antenas inteligentes está en la unión de un arreglo de antenas MIMO y un DSP, el cual es el que permite la implementación de varios algoritmos para mejorar la forma en que el AP se conecta al usuario móvil, la forma de hacer un barrido en el medio para detectar usuarios y la eliminación de interferencias.
- Las tres técnicas que existen de antenas inteligentes como son: Haz conmutado, Haz de seguimiento y Haz adaptativo, poseen ventajas y

desventajas en cuestión de sus algoritmos en la forma de mantener la conectividad, hacer barridos de detección y eliminación de interferencias, en donde los algoritmos de la técnica de Haz adaptativo posee beneficios que la llevan hacer la más óptima para pruebas en redes WLAN, destacándose características como reducción de la potencia de transmisión, utilización de propagación multitrayecto, reducción del nivel de interferencia, incremento del nivel de seguridad, incremento de la zona de cobertura, mejora de la eficiencia espectral.

## **9. RECOMENDACIONES**

En todo proyecto siempre nos encontraremos con ciertas dificultades que surgen durante el desarrollo del mismo. A continuación se detallan algunas recomendaciones que servirán para agilizar futuros estudios:

- Al momento de buscar datasheet de tipos de antenas para alguna implementación es recomendable obtener los datasheet emitidos por las marcas existentes ya que son de mayor confiabilidad.
- No confundir que una antena o un arreglo de antenas sin dispositivo transmisor pueda ser MIMO, ya que el dispositivo transmisor es el que lleva el software que permite a las antenas transmitir los datos como se describió en la sección de tecnología MIMO.
- Al momento de instalar el software de simulación CST o cualquier otro, se recomienda hacerlo en un computador de alto rendimiento, ya que de lo contrario la simulación se efectuara de forma lenta, en momentos se colgara el sistema operativo y hasta el punto de dañar el disco duro.
- Para acoplar los arreglos a cualquier dispositivo transmisor es recomendable utilizar los mismos conectores y diseñar los arreglos a la misma impedancia del conector del transmisor para evitar pérdidas por acople, en caso de que el acople no sea directo y se tenga que utilizar pigtail, estos también deben ser de la misma impedancia de la antena y el transmisor.

## **10. BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Ing. José Joskowicz. Redes de Datos. Instituto de Ingeniería Eléctrica. Facultad de Ingeniería Universidad de la República Montevideo. Uruguay Agosto 2008.
- [2] TANENBAUM, Andrew. Redes de Computadores. Cuarta Edición. Editorial Prentice Hall. 2003.
- [3] José Ignacio Alonso Montes. La situación de las Tecnologías WLAN basadas en el estándar IEEE 802.11 y sus variantes (“Wi-Fi”). COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN Madrid. 2004.
- [4] James F. Kurose. Keith W Ross. Redes de Computadoras. Quinta Edición. Editorial Pearson. 2005.
- [5] Mohammed El Yaagoubi. Acceso a Internet vía Wi-Fi WiMax. Proyecto fin de carrera. Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones. Universidad Carlos III de Madrid. 2012.
- [6] Luis Felipe Hernández Correa. Estudio del Impacto de IEEE802.11n sobre las Redes Wireless en el Perú. Tesis para optar el Título de Ingeniero de las Telecomunicaciones. Pontificia Universidad Católica del Perú. 2007.
- [7] Miguel Ferrando Bataller. Antenas. Material docente de la UPC. Universidad Politécnica de Valencia. Segunda Edición. 2002.
- [8] Juan P. Lasso E. Diego M. Méndez M. Diseño del sistema de Radiocomunicaciones del IASA en la banda de 150 MHz. Tesis para optar el Título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones. Escuela Politécnica del Ejército. Ecuador. 2009.
- [9] Ing. Sergio Buenrostro Rocha. Metodología para el Diseño y Construcción de Antenas de Microcinta en la banda WiMAX a 3.5GHz. Tesis para obtener el Grado de Maestro en Ciencias. Instituto Politécnico Nacional. México. 2007.

- [10] Ing. Edson Garduño Nolasco. Optimización de una Antena Plana para Sistemas Multiestandar SEPI – IPN. Tesis para obtener el Título de Magister en ingeniería de las telecomunicaciones. Instituto Politécnico Nacional. México. 2010.
- [11] Jaume Anguera. Antonio Pérez. Teoría de Antenas. Universidad Ramón Llull. 2008. Primera Edición.
- [12] Ing. Gabriel A. Jiménez G. Diseño de una Antena de Tamaño Pequeño en la Banda R con Metamateriales para Aplicaciones de Sensores Electromagnéticos. Tesis para obtener el Título de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica. Escuela Politécnica Nacional Ingeniería Mecánica y Eléctrica. México. 2013.
- [13] Cristian A. Guital M. Eduardo E. Muñoz B. Arquitectura de un Modelo de Redes Wireless aplicando Antenas Smart. Tesis para obtener el Título de Ingeniero Electrónico. Universidad Austral de Chile. 2006.
- [14] Juan C. Ponce V. Juan C. Perero G. Juan F. Basilio G. Transmisión VHF Banda III del Canal Internacional Ecuatoriano en la Isla San Cristóbal de las Islas Galápagos. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Ecuador. 2003.
- [15] Carmen Botella Mascarell. Algoritmos para Sistemas de Comunicaciones Multi-Usuario con Múltiples Antenas. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. España. 2008.
- [16] Yamelka Herrera H. Francisco Marante R. Sistemas MIMO empleando antenas Adaptativas. TELEM @TICA. 2013. VOL. 12. No. 3.
- [17] Jose J. Anguis Horno. Redes de Area Local Inalámbrica: Diseño de la WLAN de Wheelers Lane Technology College. Tesis para obtener el Título de Ingeniero de las Telecomunicaciones. Universidad de Sevilla. España. 2008.

- [18] Cesar V. Vargas. Wilson E. López. Carlos F. da Rocha. Sistemas de Comunicación Inalámbrica MIMO – OFDM. Universidad Federal de Santa Catarina. Vol. 3. No. 4. 2007.
- [19] Iván S. Sangucho T. Estudio de la Tecnología MIMO y su Aplicación en las Telecomunicaciones. Tesis para la obtención del Título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones. Escuela Politécnica Nacional. Quito. 2009.
- [20] Nancy P. Veloz. Evaluación de Sistemas de Múltiples Antenas MIMO en el Estándar 802.11n caso práctico Implementación de una Red MIMO. Tesis para la obtener el Título de Ingeniero en Electrónica y Computación. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 2010.
- [21] Jose E. Córdova G. Evaluación del Rendimiento de la Técnica Multi-Antena (MIMO) en Sistemas Inalámbricos OFDM mediante el desarrollo de un Simulador. Tesis para obtener el Título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones. Escuela Superior Politécnica del Litoral. 2009.
- [22] Beamforming. [En Línea]. Available: <http://www.teletopix.org/4g-lte/beamforming-in-lte/>. [Ultimo Acceso: 13 de Abril 2016].
- [23] Ing. Luqués Marcelo. Redes Wireless- Tecnología MIMO- Análisis y Performance del Estándar de Comunicaciones Inalámbricas 802.11n. Tesis para obtener el Título de Especialista en Interconexión de Redes y Servicios. Universidad Nacional de la Plata. Argentina. 2009.
- [24] Ramón Agustí. Francisco Bernardo. Fernando Casadevall, Ramon Ferrus. Jordi Pérez. Oriol Sallent. LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles. Fundación Vodafone España. 2010.

[25] Rubí Inés Salgado Martínez. Caracterización de una Antena Yagui-Uda en la Banda UHF. Tesis para obtener el Título de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica. Instituto Politécnico Nacional. México. 2012.

[26] Jose M. Vázquez Fdez. Antena Yagui-Uda. ADOQUITECNIA. No. 11. 2011.

[27] Daniel Jose Martínez A. Simulación, Implementación y puesta a punto de una Antena Yagui de 4 Elementos a 1.2 GHz: El Método de los Momentos (MoM). Tesis para obtener el Título de Ingeniero Electrónico. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2007.

[28] Antenas Yagui-Uda. [En Línea]. Available: <http://myslide.es/documents/disen-y-simulacion-de-una-antena-yagi-paper.html>. [Ultimo Acceso: 20 de Abril del 2016].

[29] R. Neri Vela. L.A. Valiente Montaña. V. Hernández Solís. Comparación de la Ganancia y otros parámetros de operación de antenas Yagui alimentadas con un dipolo recto o con un dipolo doblado. INGENIERIA Investigación y Tecnología. Vol. 7. 2006.

[30] Datasheet Antenas Yagui-Uda. [En Línea]. Available: [http://www.lanpro.com/documents/sp/wireless/lpyagi2415n\\_ss\\_spb02w.pdf](http://www.lanpro.com/documents/sp/wireless/lpyagi2415n_ss_spb02w.pdf). [Ultimo Acceso: 20 de Mayo del 2016].

[31] Datasheet Antenas Yagui-Uda. [En Línea]. Available: [http://www.wni.mx/index.php?page=shop.product\\_details&flypage=flypage\\_new.tpl&product\\_id=317&category\\_id=17&option=com\\_virtuemart&Itemid=53](http://www.wni.mx/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage_new.tpl&product_id=317&category_id=17&option=com_virtuemart&Itemid=53). [Ultimo Acceso: 20 de Mayo del 2016].

[32] Teoría de Antenas Yagui. [En Línea]. Available: <http://datateca.unad.edu.co/contenidos/208018/208018->

AVA/UNIDAD\_3/Antenas%20para%20Microondas.pdf. [Ultimo Acceso: 20 de Mayo del 2016].

[33] Constantino Pérez Vega. Antenas con Reflector Parabólico. Universidad de Cantabria. 2008.

[34] Antenas Parabólicas Grilladas. [En Línea]. Available: [http://www.wni.mx/images/stories/media/hyperlink/pdfs/DS\\_HG2424G.PDF](http://www.wni.mx/images/stories/media/hyperlink/pdfs/DS_HG2424G.PDF). [Ultimo Acceso: 30 de Mayo 2016].

[35] Datasheet de Antenas Grilladas. [En Línea]. Available: [http://www.tp-link.ec/resources/document/TL-ANT2424B\\_V1\\_Datasheet.pdf](http://www.tp-link.ec/resources/document/TL-ANT2424B_V1_Datasheet.pdf). [Ultimo Acceso: 30 de Mayo del 2016].

[36] Datasheet de Antenas Grillas. [En Línea]. Available: [http://www.wni.mx/images/stories/media/hyperlink/pdfs/DS\\_HG2415G-NF.PDF](http://www.wni.mx/images/stories/media/hyperlink/pdfs/DS_HG2415G-NF.PDF) [Ultimo Acceso: 30 de Mayo del 2016].

[37] Ing. Daniel Alejandro Hernández Jaramillo. Diseño, simulación y comparación de antenas microcintas a una frecuencia de 2.4 GHz. Previa la obtención del Grado Académico de Magíster en Telecomunicaciones. Universidad Católica Santiago de Guayaquil. Guayaquil. 2015.

[38] Rocha Buenrostro, Ing. Sergio. Metodología para el diseño y construcción de antenas de Microcinta en la banda WiMAX a 3.5GHz. , Tesis de Maestría. Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital, Instituto Politécnico Nacional. México. 2007.

[39] Waterhouse, Rod. Microstrip Patch Antennas. Lal Chand Godara. Handbook of Antennas in Wireless Communications. New York: CRC Press. 2002.

- [40] Harith Binti, Zuraidah. Desing of a circular polarization Microstrip antenna at 2.4 GHz. Tesis Doctoral. Faculty of Electrical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia. 2005.
- [41] Ing. Aidel López Gómez. Arreglo de Antenas Planares con red de Alimentación por Microcinta. Maestría en Sistemas Digitales. Instituto Politécnico Nacional. México. 2005.
- [42] Darwin Javier Jaramillo Granda. Estudio, Diseño y Construcción de un Prototipo de Arreglo de Antenas Microstrip para Recepción en la Banda X comparable a la Ganancia de una Antena Parabólica. Tesis para obtener el Título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones. Escuela Politécnica Nacional. Quito. 2013.
- [43] Datasheet de Antenas Microstrip. [En Línea]. Available: [https://dl.ubnt.com/datasheets/nanostationm/nsm\\_ds\\_web.pdf](https://dl.ubnt.com/datasheets/nanostationm/nsm_ds_web.pdf). [Ultimo Acceso: 30 de Mayo del 2016].
- [44] Andrea E. Castillo C. Edwin F. Quichimbo A. Diseño, Simulación e Implementación de antenas tipo parche rectangular para la banda ISM. Tesis para obtener el Título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Técnica Particular de Loja. Loja. 2011.
- [45] S. M. Campo. R. J. Bermúdez. F. G. Serna. Simulation and Analysis of the Radiation Patter of Microstrip Patch- Type Antenna. IEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS. Vol. 11. No. 1. 2013.
- [46] Constantine Balanis. Teoría de Antenas: Análisis y Diseño. WILEY-INTERSCIENCE. Segunda Edición. 2005.
- [47] Álvaro Roldan Escolano. Diseño y Simulación de Antena Plana. Tesis para obtener el Título de Especialista en Sonido e Imagen. Universidad Pública de Navarra. Pamplona. 2007.

[48] Ing. Aidel López Gómez. Arreglos de Antenas Planares con Red de Alimentación por Microcinta. Tesis para obtener el Título de Maestro en Ciencias. Instituto Politécnico Nacional. México. 1999.

[49] Jota V. William J. Diseño y Construcción de una Antena Planar en Tecnología Microstrip para la banda de 2.4 GHz. Tesis para obtener el Título de Ingeniero Electricista. Universidad Central de Venezuela. 2005.

[50] Cristian A. Guital M. Eduardo E. Muñoz B. Arquitectura de un Modelo de Redes Wireless aplicando Antenas Smart. Tesis para obtener el Título de Ingeniero Electrónico. Universidad Austral de Chile. 2006.

## **11.ANEXOS**

### **ANEXO 1**

#### **ESPECIFICACIONES DE ROUTER TP-LINK WR841ND**



<b>General</b>	
Standards	IEEE 802.3, 802.3u, 802.11b, 802.11g and 802.11n
Protocols	TCP/IP, PPPoE, DHCP, ICMP, NAT, SNTP
Ports	One 10/100M Auto-Negotiation WAN RJ45 port, Four 10/100M Auto-Negotiation LAN RJ45 ports supporting Auto
Cabling Type	10BASE-T: UTP category 3, 4, 5 cable (maximum 100m) EIA/TIA-568 100Ω STP
	100BASE-TX: UTP category 5, 5e cable (maximum 100m) EIA/TIA-568 100Ω STP
LEDs	PWR, SYS, WLAN, LAN (1-4), WAN, WPS
Safety & Emissions	FCC, CE
<b>Wireless</b>	
Frequency Band	2.4~2.4835GHz
Radio Data Rate	11n: up to 300Mbps (Automatic) 11g: 54/48/36/24/18/12/9/6M (Automatic) 11b: 11/5.5/2/1M (Automatic)
Frequency Expansion	DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum)
Modulation	DBPSK, DQPSK, CCK, OFDM, 16-QAM, 64-QAM
Security	WEP/WPA/WPA2/WPA2-PSK/WPA-PSK

Sensitivity @PER	270M: -68dBm@10% PER; 130M: -68dBm@10% PER 108M: -68dBm@10% PER; 54M: -68dBm@10% PER 11M: -85dBm@8% PER; 6M: -88dBm@10% PER 1M: -90dBm@8% PER
Antenna Gain	3dBi * 3
<b>Environmental and Physical</b>	
Temperature	Operating : 0°C~40°C (32°F~104°F)
	Storage: -40°C~70°C (-40°F~158°F)
Humidity	Operating: 10% - 90% RH, Non-condensing
	Storage: 5% - 90% RH, Non-condensing

## ANEXO 2

## CÓDIGO EN MATLAB PARA CALCULAR DIMENSIONES DE ANTENA PARCHE RECTANGULAR POR MÉTODO DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN

```

clc
clear all
format long
disp('=====');
disp('          DISEÑO DE ANTENA TIPO PARCHE DE FORMA RECTANGULAR');
disp('=====');
er=input('Dielectrico: ');
h=input('Grosor del sustrato en mm: ');
f=input('Frecuencia en Ghz: ');
z=input('Impedancia en ohm Zin: ');

f=f*1e9;

% ancho del parche
wid=(3e8/(sqrt((er+1)/2)*2*f))*1000; % en mm

% dielectrico efectivo
e_eff=((er+1)/2)+((er-1)/2)*(1+((12*h)/wid))^-0.5);

% extencion de la longitud
del_l=((e_eff+0.3)*((wid/h)+0.264))/((e_eff-0.258)*((wid/h)+0.8))*(0.412*h); %
en mm

% longitud efectiva
l_eff=(3e8/(2*f*sqrt(e_eff)))*1000;

% longitud
L=l_eff-(2*del_l);

                                % calculo impedancias

la=(3e8/f)*1000;
k=(2*pi)/la;
x=k*wid;
il=-2+cos(x)+(x*sinint(x))+(sin(x)/x);

% g1
g1=il/(120*pi*pi); %conductancia

a=@(th)((sin((x./2).*cos(th))./cos(th)).^2.*(besselj(0,(k.*L.*sin(th))))*(sin(th)).^3);
a1=quad(a,0,pi);

%g12
g12=a1/(120*pi*pi); %siemens
r_in=1/(2*(g1+g12)); %ohm

inset=(L/pi)*(acos(sqrt(z/r_in))); % en mm

lg_min= 6*h+L;
wg_min=6*h+wid;
borde=(wg_min-wid)/2;

% calculando ranuras

d=60*pi*pi;
t=z*sqrt(er);
B=(d/t);
m1=2*B-1;
m=log(m1);
n1=B-1;
n=log(n1);

w=(2*h/pi)*(B-1-m+(((er-1)/(2*er))*(n+(0.39*0.61)/er)));
g=(3e8*4.65e-9)/(sqrt(2*e_eff)*f*10^-9);

%
```

```

landa_m=la/sqrt(e_eff);
dh=landa_m/2;
lf=landa_m/4;

disp('=====');
disp('');
disp('          RESULTADOS = DIMENSIONES E IMPEDANCIAS');
disp('=====');
disp('');

disp(['Ancho del Parche (Wp) es: ',num2str(wid), ' mm'])
disp(['Longitud del Parche (Lp)es: ',num2str(L), ' mm'])
disp(['Longitud de la Ranura (Fi) es: ',num2str(inset), ' mm'])
disp(['Ancho de la Microcinta (Wf) es: ',num2str(w), ' mm'])
disp(['Ancho de la Ranura (Gpf) es;): ',num2str(g), ' mm'])
disp(['Longitud = Linea de Transmision (Lf) es: ',num2str(lf), ' mm'])
disp(['Ancho del Plano de Tierra (Wg) es: ',num2str(borde), ' mm'])
disp(['En arreglos == Separacion de Parches (dh=de) es: ',num2str(dh), ' mm'])

disp('=====');
disp('');

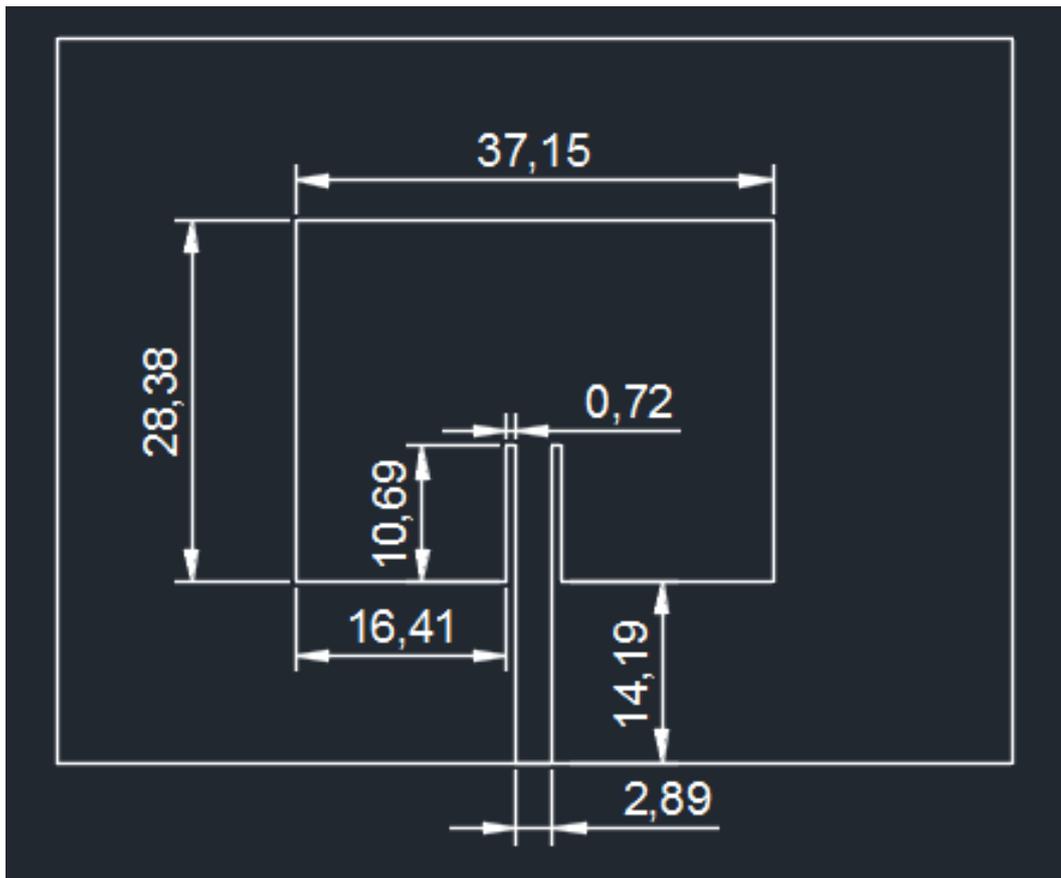
disp(['Longitud de onda es: ',num2str(la), ' mm'])
disp(['Longitud de onda m es: ',num2str(landa_m), ' mm'])
disp('=====');
disp('');

disp(['Resistencia de Entrada del Parche (Rin) es: ',num2str(r_in), ' ohm'])
disp(['Conductancia (G1) es: ',num2str(g1), ' siemens'])
disp(['Conductancia (G12) es: ',num2str(g12), ' siemens'])
disp(['ancho de banda (B) es:',num2str(B), 'Mhz'])
disp('=====');
disp('');

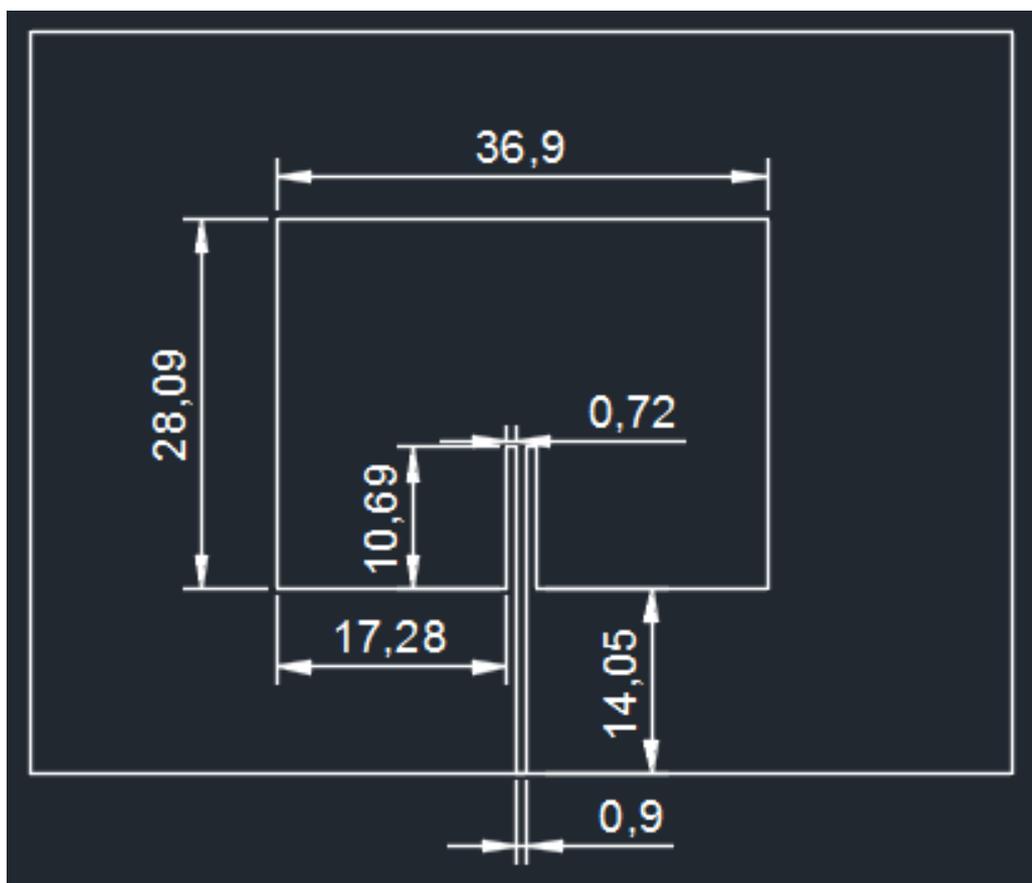
```

### ANEXO 3





**ANEXO 4**  
**DISEÑO ACOTADO DEL PARCHÉ DE 100 OHM**



**ANEXO 4**  
**DISEÑO ACOTADO DEL ARREGLO 2X2 DE 50 OHM**

