



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

**TEMA: ANÁLISIS Y MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE ANTENAS EN
LA BANDA DE 2.4 GHZ UTILIZANDO LA CÁMARA ANECOICA**

AUTOR: VALENCIA RAMÍREZ, JHONATAN RAFAEL

DIRECTOR: ING. DUQUE CAJAS, MANUEL DARÍO Ms.

SANGOLQUÍ

2018



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación "ANÁLISIS Y MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE ANTENAS EN LA BANDA DE 2.4 GHZ UTILIZANDO LA CÁMARA ANECOICA." fue realizado por el señor **Valencia Ramírez Jhonatan Rafael** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 06 de diciembre del 2018

Ing. Manuel Darío Duque Cajas. MS
CI: 1707106025



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Valencia Ramírez Jhonatan Rafael**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **"ANÁLISIS Y MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE ANTENAS EN LA BANDA DE 2.4 GHZ UTILIZANDO LA CÁMARA ANECOICA."** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas utilizadas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 06 de diciembre del 2018

JHONATAN RAFAEL VALENCIA RAMIREZ.

CI: 1722069042



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

AUTORIZACIÓN

Yo, *Valencia Ramirez Jhonatan Rafael*, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación "*ANÁLISIS Y MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE ANTENAS EN LA BANDA DE 2.4 GHZ UTILIZANDO LA CÁMARA ANECOICA*", en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 06 de diciembre del 2018

Jhonatan Rafael Valencia Ramirez

C.C.: 1722069042

DEDICATORIA

A:

Dios, por haber sido mi luz en momentos de obscuridad, por darme la fortaleza necesaria en momentos de debilidad, por guiarme por el camino correcto permitiéndome alcanzar una de mis metas en mi vida profesional.

Mis padres Iván y Ximena por ser los pilares fundamentales en mi vida, por el amor y la paciencia que me supieron brindar diariamente en el transcurso de mi carrera, por sus consejos, sus valores, su tiempo y sobre todo por ese apoyo incondicional que me ofrecieron en los momentos más difíciles de mi vida los cuales me permitieron seguir luchando para lograr cumplir mis metas.

Mis hermanos Oscar y Ricardo por el amor, complicidad, apoyo y por no abandonarme en los momentos que necesite de su compañía.

Todos mis familiares por su preocupación, por estar pendientes de mi bienestar, por la ayuda que me supieron brindar en cada momento que necesite.

Jhonatan Rafael Valencia Ramírez.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, doy gracias a Dios por haberme brindado la salud, por fortalecer mi corazón enriquecer mi espíritu e iluminar mi mente y haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido un soporte, apoyo y compañía a lo largo de todo el periodo de estudio.

Le doy gracias a toda mi familia quienes siempre creyeron en mí, en especial a mis padres y hermanos, por ayudarme a levantar de cada caída y darme ese empujón necesario para continuar luchando día a día y no dejarme desistir de cumplir mis metas. Gracias por haberme dado una carrera para mi futuro, todo esto se los debo a ustedes.

Gracias a mi director de tesis, Ingeniero Darío Duque, por su esfuerzo, dedicación y compromiso con el proyecto, por haber creído en mí, brindarme el apoyo necesario y compartir sus conocimientos durante el tiempo en el cual estuvimos trabajando para sacar adelante el proyecto de titulación.

Agradezco a todos los docentes de la universidad quienes dedicaron su tiempo a compartir sus conocimientos, anécdotas y experiencias en el transcurso de cada periodo académico. Gracias al Ingeniero David Rivas quien nos facilitó un equipo para hacer mediciones y al Ingeniero Rubén León (CICTE), por haberme prestado el conector que necesitaba.

Un agradecimiento especial a mis panas del MH y de la universidad, por haber estado siempre cuando los necesitaba, por sus consejos y acolite, gracias por haber compartido desveladas, sonrisas, lagrimas, abrazos, enojos y unas cuantas copas. Gracias Juanito por todo ese acolite, y todos estos años de amistad, más que un amigo un hermano.

A las personas que no menciono en estas líneas, gracias por haber confiado en mí y que de una manera u otra poner su granito de arena para poder culminar con mi proyecto de titulación.

Jhonatan Rafael Valencia Ramírez.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO DEL DIRECTOR.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN.....	xviii
ABSTRACT	xix
CAPITULO I INTRODUCCIÓN	20
1.1. Título del Proyecto.	20
1.2. Antecedentes	20
1.3. Justificación.....	22
1.4. Alcance.....	24
1.5. Objetivos.	24

1.5.1.	Objetivo General.	24
1.5.2.	Objetivos Específicos	25

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO 26

2.1.	Cámara Anecoica.	26
2.2.	Radio Enlace.	26
2.3.	Antena.	27
2.4.	Parámetros Fundamentales de una Antena.....	28
2.4.1.	Diagrama de Radiación.	28
2.4.1.1.	Ancho de Haz de Media Potencia (HPBW).	29
2.4.1.2.	Ancho de haz de Nulo a Nulo (FNBW).	29
2.4.1.3.	Relación de lóbulo Principal a secundario (NLPS).	30
2.4.1.4.	Relación Frente a Espalda (D/A).....	30
2.4.2.	Impedancia.	30
2.4.3.	Directividad.	31
2.4.4.	Ganancia.....	32
2.4.5.	VSWR.	32

CAPITULO III METODOLOGÍA DE ME MEDICIÓN 33

3.1.	Estimación de Estado Actual de la Cámara Anecoica.	33
3.1.1.	Valoración mediante el uso del equipo Narda NBM 550.	34
3.1.1.1.	Mediciones Fuera de la Cámara Anecoica.....	36
3.1.1.2.	Mediciones Dentro de la Cámara Anecoica.....	38

3.1.2.	Valoración mediante la medición de un Patrón de Radiación.	39
3.2.	Medición de los Parámetros de Antenas.	40
3.2.1.	Método de Dos Antenas.	41
3.2.2.	Método de Tres antenas.....	43
CAPITULO IV SIMULACIÓN.....		45
4.1.	Computer Simulation Technology (CST) Studio Suite.....	45
4.2.	Simulación de Antenas.....	46
4.2.1.	Antena Yagui-Uda.....	52
4.2.2.	Antena Dipolo.	56
4.2.3.	Antena Patch.	60
4.2.4.	Antena Arreglo Patch 2x1.	64
CAPITULO V ANÁLISIS DE RESULTADOS		68
5.1.	Estimación del Estado Actual de la Cámara Anecoica.	68
5.1.1.	Valoración mediante el uso del equipo Narda NBM 550.	68
5.1.1.1.	Fuera de la Cámara Anecoica.....	68
5.1.1.2.	Dentro de la Cámara Anecoica.....	75
5.1.2.	Valoración médiate la medición de un Patrón de Radiación.....	85
5.1.2.1.	Fuera de la Cámara Anecoica.....	85
5.1.2.2.	Dentro de la Cámara Anecoica.....	87
5.1.2.3.	Trazado de Rayos de la Cámara Anecoica.....	94
5.2.	Medición de los Parámetros de Antenas.	96

5.2.1.	Medición de Perdidas en Cables.	96
5.2.2.	Medición del VSWR.	98
5.2.3.	Medición de la Ganancia de Antenas.	102
5.2.3.1.	Método de Dos Antenas.	102
5.2.3.2.	Método de Tres Antenas.	118
5.2.4.	Medición del Patrón de Radiación y Directividad.	133
CAPITULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		143
6.1.	Conclusiones.	143
6.2.	Recomendaciones.	145
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		146

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Especificaciones de la Cámara Anecoica</i>	33
Tabla 2. <i>Elementos del Medidor Narda NBM 550</i>	35
Tabla 3. <i>Especificaciones de las Antenas</i>	51
Tabla 4. <i>Resultado de la Simulación de la Antena Yagui-Uda</i>	55
Tabla 5. <i>Resultado de la Simulación de la Antena Dipolo</i>	59
Tabla 6. <i>Resultado de la Simulación de la Antena Patch</i>	63
Tabla 7. <i>Resultado de la Simulación de la Antena Arreglo Patch 2x1</i>	67
Tabla 8. <i>Nivel de referencia de campo eléctrico fuera de la cámara anecoica</i>	68
Tabla 9. <i>Campo E fuera de la cámara, Antena Yagui-Uda en Polarización Horizontal</i>	69
Tabla 10. <i>Campo E fuera de la cámara, Antena Yagui-Uda en Polarización Vertical</i>	70
Tabla 11. <i>Campo E fuera de la cámara, Antena Logarítmica en Polarización Horizontal</i>	70
Tabla 12. <i>Campo E fuera de la cámara, Antena Logarítmica en Polarización Vertical</i>	71
Tabla 13. <i>Campo E fuera de la cámara, Antena Espiral en Polarización Circular</i>	71
Tabla 14. <i>Medidor Posición 1, comparación del campo E fuera de la cámara</i>	72
Tabla 15. <i>Medidor Posición 2, comparación del campo E fuera de la cámara</i>	73
Tabla 16. <i>Medidor Posición 3, comparación del campo E fuera de la cámara</i>	74
Tabla 17. <i>Nivel de referencia del campo eléctrico dentro de la cámara anecoica</i>	75
Tabla 18. <i>Campo E dentro de la cámara, Antena Yagui-Uda direccionada al frente</i>	76
Tabla 19. <i>Campo E dentro de la cámara, Antena Yagui-Uda direccionada al lado derecho</i>	77
Tabla 20. <i>Campo E dentro de la cámara, Antena Yagui-Uda direccionada hacia atrás</i>	78
Tabla 21. <i>Campo E dentro de la cámara, Antena Logarítmica direccionada al frente</i>	79

Tabla 22. <i>Campo E dentro de la cámara, Antena Logarítmica direccionada a la derecha.</i>	80
Tabla 23. <i>Campo E dentro de la cámara, Antena Logarítmica direccionada hacia atrás.</i>	81
Tabla 24. <i>Campo E dentro de la cámara, Antena Espiral direccionada hacia el frente.</i>	82
Tabla 25. <i>Campo E dentro de la cámara, Antena Espiral direccionada hacia la derecha.</i>	83
Tabla 26. <i>Campo E dentro de la cámara, Antena Espiral direccionada hacia la derecha.</i>	83
Tabla 27. <i>Ganancia de antena aplicando el Método de dos Antenas.</i>	131
Tabla 28. <i>Error de las mediciones al aplicar el Método de Dos Antenas.</i>	132
Tabla 29. <i>Ganancia de antena aplicando el Método de Tres Antenas.</i>	132
Tabla 30. <i>Error en la Ganancia de antena aplicando el Método de Tres Antenas.</i>	133
Tabla 31. <i>Porcentaje de error de la Directividad.</i>	137
Tabla 32. <i>Porcentaje de error de la Directividad Segunda Medición.</i>	141
Tabla 33. <i>Porcentaje de error de la Eficiencia</i>	142

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> (a) Método de dos Antenas. (b) Método de tres Antenas.	21
<i>Figura 2.</i> Elementos de un Radioenlace.....	27
<i>Figura 3.</i> Representación de un diagrama de radiación.	28
<i>Figura 4.</i> Lóbulos en un Patrón de Radiación.....	29
<i>Figura 5.</i> Ancho de Haz de Media Potencia.....	29
<i>Figura 6.</i> Ancho de Haz de Nulo a Nulo.....	30
<i>Figura 7.</i> Impedancia de entrada de una antena.	30
<i>Figura 8.</i> Cámara Anecoica ESPE.	34
<i>Figura 9.</i> Medidor Narda NBM 550.....	35
<i>Figura 10.</i> Componentes del medidor Narda NBM 550.	35
<i>Figura 11.</i> Posición del Medidor Fuera de la Cámara Anecoica.....	36
<i>Figura 12.</i> Mediciones Fuera de la Cámara Anecoica..	37
<i>Figura 13.</i> Posición del Medidor dentro de la Cámara Anecoica.....	38
<i>Figura 14.</i> Ubicación del Medidor Narda NBM 550 dentro de la cámara anecoica.	39
<i>Figura 15.</i> Equipo de medición WATS-2002	40
<i>Figura 16.</i> Medición de la ganancia de antena utilizando dos equipos.....	41
<i>Figura 17.</i> Medición de la ganancia de antena utilizando un Analizador de Redes.....	42
<i>Figura 18.</i> Método de Tres Antenas.....	43
<i>Figura 19.</i> CST Studio Suite.	45
<i>Figura 20.</i> Nuevo Proyecto CST	46
<i>Figura 21.</i> Simulación de Antenas Planas.....	47

Figura 22. Simulación en el Dominio del Tiempo o Frecuencia	47
Figura 23. Unidades de las variables de simulación.	48
Figura 24. Rango de Frecuencia y Monitores de la Simulación.	48
Figura 25. Resumen de los parámetros de simulación.	49
Figura 26. Creación de la Antena.	50
Figura 27. Empezar la simulación de la Antena.	50
Figura 28. Resultados de la Simulación.	51
Figura 29. Esquema de la Antena Yagui-Uda.	52
Figura 30. Coeficiente de Reflexión S_{11} de la Antena Yagui-Uda.	52
Figura 31. VSWR de la Antena Yagui-Uda.	53
Figura 32. Diagrama de Radiación en 3D de la Antena Yagui-Uda	53
Figura 33. Diagrama de Radiación en Coordenadas Polares, Plano E. Antena Yagui-Uda	54
Figura 34. Diagrama de Radiación en Coordenadas Polares, Plano H	55
Figura 35. Esquema de la Antena Dipolo	56
Figura 36. Coeficiente de Reflexión S_{11} de la Antena Dipolo.	56
Figura 37. VSWR de la Antena Dipolo	57
Figura 38. Diagrama de Radiación en 3D de la Antena Dipolo.	57
Figura 39. Diagrama de Radiación en Coordenadas Polares, Plano E Antena Dipolo	58
Figura 40. Diagrama de Radiación en Coordenadas Polares, Plano H, Antena Dipolo.	59
Figura 41. Esquema de la Antena Patch.	60
Figura 42. Coeficiente de Reflexión S_{11} de la Antena Patch.	60
Figura 43. VSWR de la Antena Patch.	61

Figura 44. Diagrama de Radiación en 3D de la Antena Patch.....	61
Figura 45. Diagrama de Radiación en Coordenadas Polares, Plano E, Antena Patch.	62
Figura 46. Diagrama de Radiación en Coordenadas Polares, Plano H	63
Figura 47. Esquema de la Antena Arreglo Patch 2x1.	64
Figura 48. Coeficiente de Reflexión S_{11} de la Antena Arreglo Patch 2x1.	64
Figura 49. VSWR de la Antena Arreglo Patch 2x1.	65
Figura 50. Diagrama de Radiación en 3D de la Antena Arreglo Patch 2x1.	65
Figura 51. Diagrama de Radiación en Coordenadas Polares, Plano E, Arreglo Patch 2x1.	66
Figura 52. Diagrama de Radiación en Coordenadas Polares, Plano H, Arreglo Patch 2x1	67
Figura 53. Medición del patrón de Radiación fuera de la cámara.....	85
Figura 54. Primera medición Antena Yagui-Uda polarización horizontal. (a)	86
Figura 55. Primera medición Antena Yagui-Uda polarización vertical. (a)	86
Figura 56. Comparación entre polarización (a) horizontal y (b) vertical, antena Yagui-Uda.....	87
Figura 57. Ubicación de las antenas dentro de la cámara anecoica.	87
Figura 58. Primera medición en la cámara Antena Yagui-Uda polarización horizontal (a).....	88
Figura 59. Primera medición en la cámara Antena Yagui-Uda polarización vertical (a)	89
Figura 60. Tercera medición en la cámara Antena Yagui-Uda polarización horizontal.....	89
Figura 61. Cuarta medición en la cámara Antena Yagui-Uda polarización horizontal.	90
Figura 62. Quinta medición en la cámara Antena Yagui-Uda polarización horizontal.	90
Figura 63. Sexta medición en la cámara Antena Yagui-Uda polarización horizontal.	91
Figura 64. Séptima medición en la cámara Antena Yagui-Uda polarización horizontal.....	91
Figura 65. Octava medición en la cámara Antena Yagui-Uda, con splitters.	92

Figura 66. Medición en la cámara Yagui-Uda polarización horizontal (a) y vertical (b).	92
Figura 67. Múltiples Trayectorias.	95
Figura 68. Angulo de incidencia sobre el absorbente.	95
Figura 69. Medición de Perdidas en Cables.	97
Figura 70. Medición de Perdidas en el Cable de Transmisión.	97
Figura 71. Medición de Perdidas en el Cable de Recepción.	97
Figura 72. Medición del VSWR.	98
Figura 73. VSWR Antena Yagui-Uda.	98
Figura 74. VSWR Antena Dipolo	99
Figura 75. VSWR Antena Patch.	100
Figura 76. VSWR Antena Arreglo Patch.	101
Figura 77. Antena Yagui-Uda polarización Horizontal (a) y Vertical (b)	102
Figura 78. Señal Recibida Antena Yagui-Uda polarización horizontal.	103
Figura 79. Señal Recibida Antena Yagui-Uda polarización vertical.	104
Figura 80. Antena Dipolo polarización Horizontal (a) y Vertical (b).	105
Figura 81. Señal Recibida Antena Dipolo polarización horizontal.	105
Figura 82. Señal Recibida Dipolo polarización vertical.	106
Figura 83. Antena Patch polarización Horizontal (a) y Vertical (b)	107
Figura 84. Señal Recibida Antena Patch polarización horizontal.	107
Figura 85. Señal Recibida Antena Patch polarización vertical.	108
Figura 86. Antena Arreglo Patch 2x1 polarización Horizontal (a) y Vertical (b).	109
Figura 87. Señal Recibida Antena Arreglo Patch 2x1 polarización horizontal.	109

Figura 88. Señal Recibida Arreglo Patch 2x1 polarización vertical.	110
Figura 89. S ₂₁ Antena Yagui-Uda polarización horizontal.	111
Figura 90. S ₂₁ Antena Yagui-Uda polarización vertical.	112
Figura 91. S ₂₁ Antena Dipolo polarización horizontal.	113
Figura 92. S ₂₁ Antena Dipolo polarización vertical.	114
Figura 93. S ₂₁ Antena Patch polarización horizontal.	115
Figura 94. S ₂₁ Antena Patch polarización vertical.	116
Figura 95. S ₂₁ Antena Arreglo Patch 2x1 polarización horizontal.	117
Figura 96. S ₂₁ Antena Arreglo Patch 2x1 polarización vertical.	118
Figura 97. Primer Escenario Método de Tres Antenas.	119
Figura 98. Primer Escenario Medida M ₁₂	119
Figura 99. Primer Escenario Medida M ₁₃	120
Figura 100. Primer Escenario Medida M ₂₃	120
Figura 101. Segundo Escenario Medida M ₁₂	122
Figura 102. Segundo Escenario Medida M ₁₃	123
Figura 103. Segundo Escenario Medida M ₂₃	123
Figura 104. Tercer Escenario Medida M ₁₂	125
Figura 105. Tercer Escenario Medida M ₁₃	126
Figura 106. Tercer Escenario Medida M ₂₃	126
Figura 107. Cuarto Escenario Método de Tres Antenas.	128
Figura 108. Cuarto Escenario Método de Tres Antenas.	129
Figura 109. Cuarto Escenario Método de Tres Antenas.	129

Figura 110. Diagrama de radiación Yagui-Uda Polarización Horizontal (a) y Vertical (b)	134
Figura 111. Diagrama de radiación Dipolo Polarización Horizontal (a) y Vertical (b).....	135
Figura 112. (a) Diagrama de radiación Antena Patch Polarización Horizontal. y Vertical (b) ..	136
Figura 113. Diagrama de radiación Arreglo Patch Polarización Horizontal (a) y Vertical (b)...	137
Figura 114. Diagrama de radiación Yagui-Uda Polarización Horizontal (a) y Vertical (b)	138
Figura 115. Diagrama de radiación Dipolo Polarización Horizontal (a) y Vertical (b).....	139
Figura 116. Diagrama de radiación Patch Polarización Horizontal (a) y Vertical (b).	140
Figura 117. Diagrama de radiación Antena Dipolo Polarización Horizontal (a) y Vertical (b).	141

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se enfocó en analizar y validar los principales parámetros de una antena tales como: ganancia, directividad, VSWR, relación frente/espalda, etc, a través de un método comparativo entre paquetes de simulación y valores medidos utilizando la cámara anecoica diseñada y construida en la ESPE en el año 2006, que actualmente se encuentra operativa. El parámetro ganancia de antena se determinó utilizando un método indirecto como es el análisis comparativo de dos y tres antenas. El parámetro de directividad se determinó a través de los patrones de radiación que se obtengan en la cámara anecoica. Los demás parámetros se obtuvieron mediante el uso de instrumentos y gráficas. Se utilizó un medidor de radiaciones no ionizantes de banda ancha Narda NBM 550, junto con la medición del patrón de radiación de una antena, para garantizar la operatividad de la cámara anecoica. La cámara anecoica fue diseñada y construida en la banda de 2 a 3 GHz, por lo cual se eligió un grupo de antenas que trabajen en dicha banda así: Yagui-Uda de cinco elementos, Patch de un elemento, Arreglo Patch 2x1 y Dipolo de longitud resonante, todas de micro línea a 2.45 GHz. Se utilizó un Software de simulación de antenas con el cual se obtuvo los parámetros de las antenas; estos parámetros fueron comparados con los medidos en la cámara anecoica y/o instrumentos.

PALABRAS CLAVE:

- **CÁMARA ANECOICA**
- **PARÁMETROS DE ANTENAS**
- **BANDA DE 2.4 GHZ**

ABSTRACT

The present research work focused on analyzing and validating the main parameters of an antenna such as: gain, directivity, VSWR, front / back ratio, etc., through a comparative method between simulation packages and measured values using the anechoic chamber designed and built in the ESPE in 2006, which is currently operational. The antenna gain parameter was determined using an indirect method such as the comparative analysis of two and three antennas. The directivity parameter was determined through the radiation patterns obtained in the anechoic chamber. The other parameters were obtained through the use of instruments and graphs. A broadband non-ionizing radiation meter Narda NBM 550 was used, together with the measurement of the radiation pattern of an antenna, to guarantee the operation of the anechoic chamber. The anechoic chamber was designed and built in the 2 to 3 GHz band, for which a group of antennas working in this band were chosen: Yagui-Uda with five elements, Patch of one element, Fix Patch 2x1 and Dipole of resonant length, all of micro line at 2.45 GHz. An Antenna Simulation Software was used with which the parameters of the antennas were obtained; These parameters were compared with those measured in the anechoic chamber and / or instruments.

KEYWORDS:

- **ANECHOIC CHAMBER**
- **ANTENNA PARAMETERS**
- **2.4 GHZ BAND**

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

En el primer capítulo se detalla de manera general los principales aspectos del proyecto de investigación como son: Los trabajos que tiene afinidad que han sido realizados anteriormente, la justificación e importancia, el alcance del proyecto y por ultimo de define los objetivos tanto general como específicos.

1.1. Título del Proyecto.

Análisis y medición de parámetros de antenas en la banda de 2.4 GHz utilizando la cámara anecoica.

1.2. Antecedentes

Realizar mediciones en un ambiente sin interferencias y con características similares al del espacio libre, es el principal objetivo de una cámara anecoica. En el año 2006, se realizó la construcción de una cámara anecoica, para el laboratorio de Electromagnetismo y Antenas de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, con un rango de operación de 2 a 3 GHz, comprobando que para señales a una frecuencia de 3 GHz existe una atenuación menor que en el espacio libre en cambio, para señales en la frecuencia de 2 GHz la atenuación es levemente mayor que en campo abierto. Demostrado de esta manera la funcionalidad dela cámara anecoica. (Brito Flores & Lopez Campos, 2006).

Para determinar la ganancia de una antena existen diversos métodos de medición, los cuales varían según el nivel de complejidad, frecuencia, equipos o instrumentos que se tenga a disposición, como por ejemplo el método de dos y tres antenas, como se muestra en la **Figura 1**.

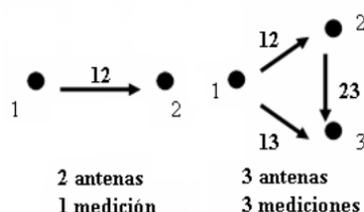


Figura 1. (a) Método de dos Antenas.

(b) Método de tres Antenas.

Fuente: (Medina Monroy, Díaz Tapia, Olvera Cervantes, Chávez Pérez, & Velázquez Ventura, 2008)

Los autores del trabajo (Medina Monroy, Díaz Tapia, Olvera Cervantes, Chávez Pérez, & Velázquez Ventura, 2008), aplican la metodología de medición de dos, tres y cuatro antenas para determinar la ganancia de cuatro tipos de antenas como son: dos arreglos de tipo Patch 4x2 y dos Patch de un elemento, obteniendo resultados satisfactorios se observó que se disminuye el error entre cada método de medición, siendo el de cuatro antenas el más óptimo.

En un segundo trabajo de investigación se utiliza el método de tres antenas, para determinar la ganancia de tres antenas de tipo bocina de ganancia estándar (SGH), en una instalación de rango de prueba compacta, las cuales trabajan en la banda Q (30 GHz a 50 GHz), obteniendo buenos resultados en un rango estrecho de 33 a 35 GHz, de modo que en 34 GHz la ganancia según el fabricante es de 24,66 dBi, y de acuerdo con las mediciones se obtiene una ganancia de 24.7 dBi, siendo valores muy aproximados, sin embargo en los extremos tanto en 33 como en 35 GHz se obtiene una variación superior a 2 dBi, atribuyendo esta diferencia a diversos factores como pérdidas en cables, conectores alineamiento de las antenas, etc. (Shakhtour, Cornelius, & Heberling, 2013).

Otra investigación realiza la investigación y desarrollo matemático necesario para obtener la ganancia de dos antenas a cortas distancias, la desventaja de este método es que las dos antenas utilizadas para la medición deben tener las mismas características y en el caso de no contar con

antenas semejantes, se utiliza una superficie reflectante o un espejo para producir la imagen de la antena, no obstante, no es muy recomendable. (Kerns, 1970).

En una siguiente investigación se realiza un estudio de la aplicación del método de tres antenas en un concepto de medición RCS junto con la matriz de dispersión de la antena, el objetivo principal de la investigación no solo es medir la ganancia de la antena, sino también las características de los parámetros de dispersión y la impedancia de entrada de la antena, además a aplicar este método combinado se resuelve las características de dispersión de cada antena, así como también este método elimina las necesidades de un cable de retorno, una antena de referencia o el procedimiento de calibración polimétrica. (Hsin-Chia & Tah-Hsing, 1999).

1.3. Justificación.

Cámara anecoica, proviene de las siglas (an-ecoico cuyo significado es no eco o sin eco) es una cuarto el cual es diseñado con el fin de absorber los reflejos de ondas sonoras o electromagnéticas. Una cámara anecoica se encuentra conformada por dos partes fundamentales. La primera es una estructura conocida como jaula de Faraday, la cual tiene la capacidad de atenuar todos los campos incidentes de las ondas. La segunda son aquellos materiales que cubren por completo el interior de la cámara y tienen la capacidad de absorber ondas electromagnéticas, es decir, cuentan con propiedades de absorción, con la finalidad de simular las características de espacio libre.

Por esta razón, el lugar más óptimo para realizar mediciones de los parámetros de una antena o de un circuito de microonda resulta ser una cámara anecoica, debido a que genera con una gran nivel de exactitud condiciones de propagación en el espacio libre, atenuando las interferencias externas con el fin de evitar cualquier influencia al interior de la cámara, y a su vez en el interior

actúan los materiales absorbentes atenuando los campos electromagnéticos generados, mismos que podrían afectar las mediciones.

En el laboratorio de Antenas y Electromagnetismo (LABEA) se han realizado mediciones de antenas en el medio ambiente del laboratorio y, en ciertas ocasiones en la cámara anecoica. No obstante, se tiene incertidumbre de la confiabilidad de los datos obtenidos. Razón por la cual se va a utilizar la cámara anecoica la cual genera un ambiente ideal para obtener la medición de los parámetros de las antenas. Sin embargo, si los errores obtenidos superan los máximos tolerables; se introducirán factores de corrección que no se han tomado en cuenta y que serán obtenidos utilizando el equipo de radiaciones no ionizantes de banda ancha Narda NBM 550.

Una antena es definida como un elemento perteneciente a un sistema de telecomunicaciones que forma parte de un transmisor o receptor, diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas, y tienen la capacidad de operar a frecuencias de RF y microondas. Las antenas tienen características o parámetros de suma importancia como son: ganancia, directividad, impedancia de entrada, VSWR, patrón de radiación, relación F/B, nivel de lóbulo primario a secundario NLPS, ancho de banda de interés, sin embargo, la ganancia de la antena resulta ser el principal parámetro de estudio debido a que es utilizado para el cálculo de los enlaces radioeléctricos, sistemas de navegación, sistemas de radiolocalización, sistemas satelitales, radar, etc.

Existen diferentes metodologías de medición para determinar los parámetros de una antena, las cuales que pueden variar el nivel de dificultad según el nivel de precisión que se requiera o la infraestructura, equipos disponibles y frecuencia de operación. Por ejemplo, para frecuencias superiores a 1 GHz, usualmente se utiliza el espacio libre para realizar las mediciones, por otro

lado, a frecuencias menores, las mediciones se realizan bajo condiciones de espacio libre, debido a que es difícil simular las condiciones de espacio libre por las longitudes de onda grandes.

En el presente proyecto de investigación se presentará dos metodologías disponibles para determinar los principales parámetros de las antenas como son ganancia, directividad, ancho de haz de nulo a nulo, VSWR, ancho de banda, relación frente/espalda e impedancia, a una frecuencia de 2.4 Ghz, en la cámara anecoica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Finalmente, con la ayuda de un software de simulación se trabajará en un proceso inverso y de esta manera realizar un análisis de resultados, determinando los errores en la exactitud de las mediciones efectuadas con cada método, par de esta manera tener una validez de la medición, la cual se refiere a que se debe tener confiabilidad en el método utilizado en la obtención de los parámetros de las antenas.

1.4. Alcance.

La finalidad del presente trabajo de investigación es garantizar la operatividad de uso de la cámara anecoica, con el propósito de obtener los principales parámetros, tales como: ganancia, directividad, VSWR, etc, de antenas de micro línea a una frecuencia de trabajo de 2.45 Ghz, aplicando metodologías de mediciones indirectas de dos y tres antenas. Por ultimo a través de un software de simulación presentar los resultados obtenidos de los parámetros de antenas.

1.5. Objetivos.

1.5.1. Objetivo General.

Analizar y medir los parámetros de las antenas en la cámara anecoica en la banda de 2.4 GHz, y realizar un análisis comparativo con herramientas de simulación de antenas.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Realizar un análisis del estado actual de la cámara anecoica ubicada en el laboratorio de Antenas y Electromagnetismo de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, utilizando el medidor de radiaciones no ionizantes de banda ancha Narda NBM 550, y mediciones patrones de radiación.
- Investigar sobre los métodos de medición de dos antenas y tres antenas para determinar la ganancia de antena.
- Realizar las mediciones en la cámara anecoica de las antenas.
- Investigar sobre herramientas de simulación de antenas, y realizar la simulación de cada antena utilizada.
- Realizar un análisis comparativo entre los datos de la simulación y las mediciones experimentales.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se detallará de forma general los conceptos principales que se debe tener en cuenta para comprender de mejor manera el desarrollo del proyecto de investigación. En primer lugar, se empezará describiendo la cámara anecoica, propiedades características y funciones. A continuación, se dará una breve explicación de los conceptos fundamentales de una antena, las características principales de los tipos de antenas que fueron utilizadas en el proyecto de investigación, así como los parámetros fundamentales de las mismas.

2.1. Cámara Anecoica.

Una cámara anecoica es una habitación completamente sellada y cubierta en su totalidad por materiales que absorben o dispersan todo tipo de radiación acústica o electromagnética, tanto del interior como del exterior, con el fin de aparentar un entorno similar al espacio libre. Las cámaras anecoicas generalmente se clasifican en Acústicas, con el fin de poder determinar el nivel de potencia de una fuente de sonido, función de transferencia de un altavoz o micrófonos. La segunda es Electromagnética, las cuales son utilizadas para realizar mediciones de antenas, radares y pruebas de inferencia electromagnética, compatibilidad electromagnética, ganancia, directividad etc. (Barrionuevo & Gonzales , 2012).

2.2. Radio Enlace.

Un radio enlace se define como una comunicación inalámbrica bidireccional entre dos puntos ubicados a una distancia determinada en la superficie terrestre. Generalmente los radioenlaces se encuentran trabajando a frecuencias desde 800 MHz a 42 GHz. Un radioenlace se encuentra

constituido por tres partes fundamentales, la primera es la parte de transmisión, la segunda la propagación y la tercera la recepción como se indica en la **Figura 2**. (Murillo Fuentes, 2005)



Figura 2. Elementos de un Radioenlace.

Fuente: (Murillo Fuentes, 2005)

Por lo tanto, se en un radioenlace se puede considerar la siguiente expresión matemática, con la cual dependiendo de la información que se tenga se puede calcular parámetros como: Potencia de transmisión, potencia de receptor, Ganancia de antena de transmisión o recepción, etc.

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{antTx} + G_{antRx} - L_b - L_{cables\ y\ conectores} \quad (1)$$

Donde: P_{rx} , es la Potencia en el Transmisor, P_{tx} , es la Potencia en el Receptor, G_{antTx} , es la Ganancia de la antena de transmisión, G_{antRx} , es la Ganancia de la antena de recepción, L_b es la Pérdida en el espacio libre y $L_{cables\ y\ conectores}$, es la Perdida por Cables y Conectores.

2.3. Antena.

Una antena se define como un dispositivo principal de un sistema de telecomunicaciones o radioenlace, capaz de emitir o recibir señales u ondas electromagnéticas, de acuerdo al su diseño pueden operar a diferentes potencias y rangos de frecuencia. (Manuel Huidobro, 2013).

2.4. Parámetros Fundamentales de una Antena.

2.4.1. Diagrama de Radiación.

Un diagrama de radiación o Patrón de radiación de una antena resulta ser una representación gráfica de la forma que se encuentra distribuida la función matemática de la densidad de potencia electromagnética radiada. Existen dos vistas fundamentales en perspectiva del patrón de radiación, las cuales son conocidas como el plano-E y e plano-H, el primero hace referencia al plano paralelo al vector intensidad de campo eléctrico en su dirección máxima y el segundo es el plano perpendicular al mismo. El patrón de radiación suele ser representado de varias maneras como por ejemplo: en el sistema de coordenadas esféricas en función de los ángulos θ y ϕ , en un gráfico en tercera dimensión y por último en un diagrama polar, como se muestran en la **Figura 3.(a), (b), y (c)**, respectivamente. (Anguera & Pérez, 2008).

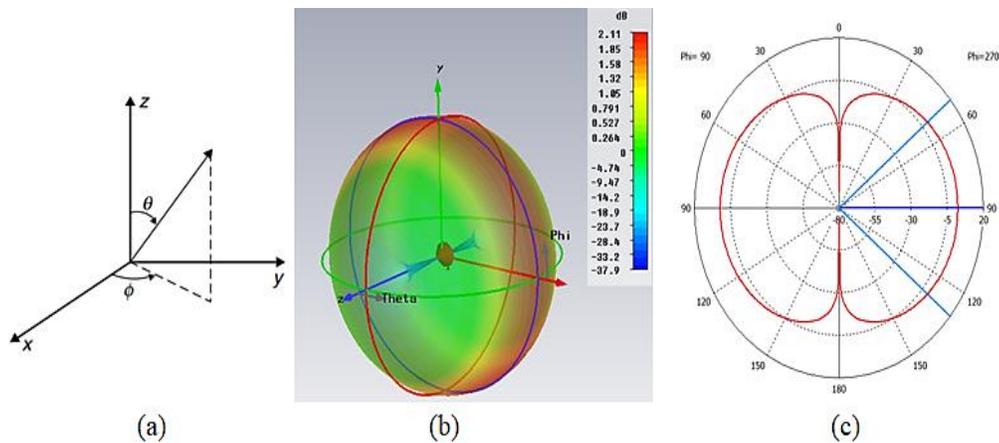


Figura 3. Representación de un diagrama de radiación.

En un diagrama de radiación se puede distinguir diferentes tipos de lóbulos, entre los cuales se puede mencionar: lóbulo principal, laterales, secundario y posterior, como se puede observar en la **Figura 4.** (Anguera & Pérez, 2008)

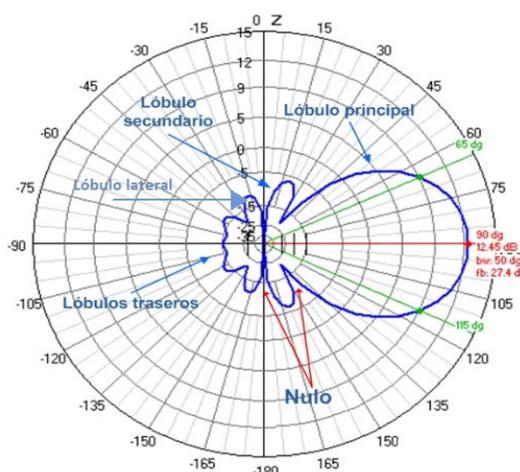


Figura 4. Lóbulos en un Patrón de Radiación.

A continuación, se menciona varios conceptos que se relacionan directamente con el diagrama de radiación.

2.4.1.1. Ancho de Haz de Media Potencia (HPBW).

El ancho de haz de media potencia se refiere a una abertura angular existente entre los -3dB de los planos E y H del diagrama de radiación como se muestra en la **Figura 5**. (Balanis, 2005)

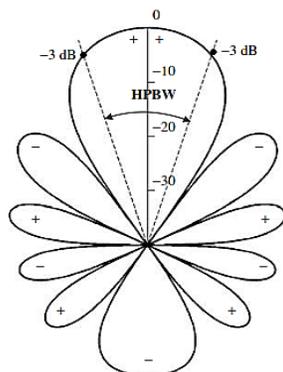


Figura 5. Ancho de Haz de Media Potencia.

Fuente: (Balanis, 2005)

2.4.1.2. Ancho de haz de Nulo a Nulo (FNBW).

El ancho de haz de nulo a nulo se refiere a la abertura angular existente entre los valores donde el Diagrama de radiación toma un valor muy pequeño, como se observa en la **Figura 6**. (Balanis, 2005)

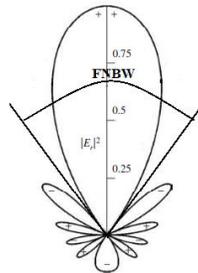


Figura 6. Ancho de Haz de Nulo a Nulo.
Fuente: (Balanis, 2005)

2.4.1.3. Relación de lóbulo Principal a secundario (NLPS).

Como su nombre lo indica es la relación existente entre el valor máximo del diagrama de radiación, es decir del lóbulo principal con respecto al máximo valor del lóbulo secundario existente en el diagrama de radiación. (Balanis, 2005).

2.4.1.4. Relación Frente a Espalda (D/A).

Como su nombre lo indica es la relación existente entre el valor máximo del diagrama de radiación, es decir del lóbulo principal con respecto a su opuesto, es decir del lóbulo posterior. (Balanis, 2005)

2.4.2. Impedancia.

La impedancia de entrada de una antena no es más que la relación existente entre la tensión de voltaje y la intensidad de corriente en los terminales de entrada de la antena, el valor de la impedancia depende directamente de la frecuencia de operación de la antena y posee una parte real a la cual se denomina resistencia y una parte imaginaria denominada reactancia, como se muestra en la **Figura 7**. (Balanis, 2005).

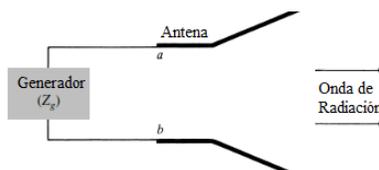


Figura 7. Impedancia de entrada de una antena.
Fuente: (Balanis, 2005)

$$Z_{ab} = \frac{V_{ab}}{I} = R_a + jX_a \quad (2)$$

Donde: Z_{ab} , es la Impedancia de entrada de la antena, R_a , es la Resistencia de la antena y jX_a , es la Reactancia de la antena.

2.4.3. Directividad.

La directividad de una antena hace referencia a la relación existente entre la intensidad de potencia de radiación a una dirección específica con respecto al promedio existente de la intensidad de potencia de radiación en todas las direcciones, con respecto a una distancia específica. (Balanis, 2005).

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{AV}(\theta, \phi)} \quad (3)$$

Donde $U(\theta, \phi)$, es la Intensidad de potencia de radiación y U_{AV} , es la Intensidad de potencia promedio.

Para el caso donde no se especifique una dirección para los ángulos θ, ϕ , se tomará como dirección la máxima potencia de radiación. (Balanis, 2005).

$$D = \frac{P_{max}}{P_r / (4\pi r^2)} \quad (4)$$

La directividad de una antena se puede deducir a partir de su diagrama de radiación, cuando este presenta un lóbulo principal de radiación y varios lóbulos secundarios menores. Se considera que se produce una radiación uniforme entre los anchos de haz de media potencia (HPBW). (Cardama Aznar, 2002).

$$D = \frac{4\pi}{\Delta\theta_{-3dB}^E * \Delta\theta_{-3dB}^H} \quad (5)$$

2.4.4. Ganancia.

El parámetro de ganancia de antena resulta ser el de mayor importancia dentro de un radioenlace. Su definición es muy similar al parámetro de Directividad, con la diferencia que se encuentra relacionada con la densidad de radiación de una antena isotrópica sin pérdidas. A su vez la Ganancia y Directividad de una antena se encuentran relacionados con la eficiencia de la antena η_r , de la siguiente manera:

$$G = \eta_r * D \quad (6)$$

2.4.5. VSWR.

VSWR por sus siglas en inglés (*Voltage Standing Wave Ratio*), conocido de igual manera como ROE (Relación de Onda Estacionaria), es la relación existente entre la energía transmitida con respecto a la cantidad de energía que es reflejada por la antena. (Cardama Aznar, 2002)

$$VSWR = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (7)$$

Donde Γ , es el Coeficiente de reflexión.

CAPITULO III

METODOLOGÍA DE ME MEDICIÓN

En el presente capítulo se detalla el procedimiento aplicado para: en primer lugar, evaluar el estado actual de la cámara anecoica ubicada en el Laboratorio de Electromagnetismo y Antenas de la Universidad de las Fuerzas Armadas –“ESPE”, verificando si existe fugas o penetración de radiación de campo eléctrico, mediante el uso del medidor de radiaciones no ionizantes de banda ancha Narda NBM 550. En segundo lugar, se procedió a realizar mediciones del patrón de radiación de una antena, variando parámetros como distancia de separación, alineación de las antenas hasta llegar a obtener un buen nivel de confiabilidad de las mediciones, realizando una comparación con los valores teóricos o simulados. Una vez logrado alcanzar dicho nivel de confiabilidad se procedió a realizar las mediciones indirectas de los parámetros de las antenas. Los resultados de todas las mediciones realizadas se presentan en el Capítulo V.

3.1. Estimación de Estado Actual de la Cámara Anecoica.

La Universidad de las Fuerzas Armadas –“ESPE”, cuenta con una cámara anecoica, la cual se encuentra ubicada en el Laboratorio de Antenas y Electromagnetismo. Fue diseñada y construida en el año 2006 con las especificaciones mostradas en la **Tabla 1**.

Tabla 1.

Especificaciones de la Cámara Anecoica

Frecuencia de operación	De 2 GHz a 3 GHz
Largo	4.8 m
Ancho	3 m
Espesor de los conos	21 cm y 30 cm

Fuente: (Brito Flores & Lopez Campos, 2006).

La ubicación de las antena de transmisión y recepción, en un principio fue ubicadas a una distancia de separación de 2.2 m, a 1.2 m de las paredes laterales y 1 m de las paredes posteriores a las antenas como se muestra en la **Figura 8**.

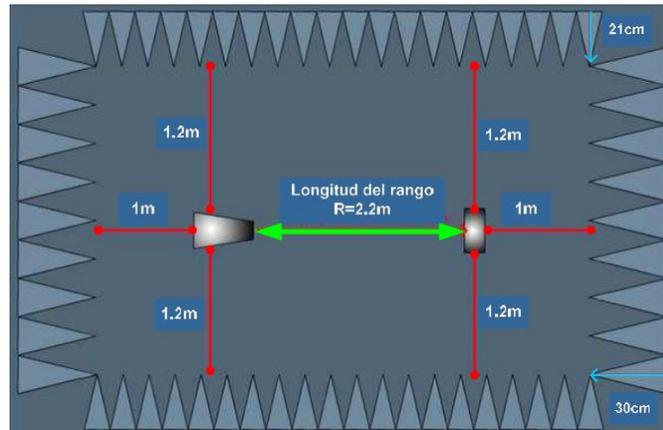


Figura 8. Cámara Anecoica ESPE.

Fuente: (Brito Flores & Lopez Campos, 2006)

Es importante mencionar que fue retirado cuatro planchas de conos del piso de la cámara anecoica con el fin de poder manipular las antenas de transmisión y recepción dentro de la cámara. En base a esta distribución se procedió a valorar el estado actual de funcionamiento. En primer lugar, se realizó mediciones del campo eléctrico con el medidor de radiaciones no ionizantes Narda NBM 550, con el fin de verificar si existe penetración o fugas de campo eléctrico en la cámara anecoica. Como siguiente paso, se procedió a realizar la medición del patrón de radiación de una antena para verificar que la gráfica del mismo tenga un nivel de aproximación y confiabilidad con la teoría.

3.1.1. Valoración mediante el uso del equipo Narda NBM 550.

El equipo Narda NBM 550, mostrado en la **Figura 9**, es usado para medir las radiaciones no ionizantes en el ambiente, esencialmente los campos eléctricos y magnéticos, opera en un rango de frecuencias de 100 KHz a 60 GHz. (Narda Safety Test Solutions , 2006).



Figura 9. Medidor Narda NBM 550.

Fuente: (Narda Safety Test Solutions , 2006)

A continuación en la **Figura 10**, se presenta un breve resumen de los componentes del medidor con sus respectivas funcionalidades como se observa en la **Tabla 2**.



Figura 10. Componentes del medidor Narda NBM 550.

Fuente: (Narda Safety Test Solutions , 2006)

Tabla 2.

Elementos del Medidor Narda NBM 550

1	Conector de la sonda de medición.
2	Micrófono
3	Pantalla
4	Panel de Operación.
5	Soporte para Trípode
6	Conectores Eléctricos y Ópticos
6a	Conector USB
6b	Audífono
6c	Conector Óptico
6d	Conector para el Cargador
7	Cabeza de la Sonda
8	Enchufe de la sonda

Fuente: (Narda Safety Test Solutions , 2006)

En el panel de Operación (Punto 4), se encuentran 6 botones, que son el de encendido y apagado, las flechas de navegación, y los cuatro restantes son los botones que nos permiten acceder a las diferentes configuraciones del medidor, útiles realizar las mediciones correspondientes.

3.1.1.1. Mediciones Fuera de la Cámara Anecoica.

Se procedió a determinar en nivel de referencia de campo eléctrico existente en el medio ambiente fuera de la cámara anecoica. Las mediciones fueron realizadas con las lámparas del laboratorio apagadas, para evitar la influencia de las ondas de luz que radian las lámparas. La medición realizada fue un promedio del campo eléctrico captado en el medio ambiente en un tiempo de 3 minutos. El medidor fue colocado en tres posiciones diferentes, la primera en el centro de la parte de la antena, la segunda en el centro de la parte lateral y la ultima en el centro de la parte posterior de la cámara anecoica, todas a una altura de 1.23 metros con referencia del suelo, tal como se muestra en la

Figura 11. Posición del Medidor Fuera de la Cámara Anecoica.

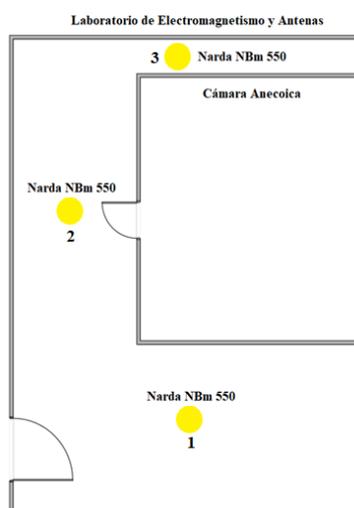


Figura 11. Posición del Medidor Fuera de la Cámara Anecoica.

Una vez determinado el nivel de referencia de campo eléctrico existente fuera de la cámara anecoica, se procedió a realizar las mediciones esta vez con la intervención de una antena

transmisora, ubicada dentro de la cámara anecoica, apuntando en tres direcciones como fueron: al frente, lateral y posterior. El medidor Narda NBM 550, fue ubicado de igual forma en las tres posiciones donde se encontraba apuntando la antenna, a una distancia de 3.22 metros, con respecto a la antenna y una altura de 1.3 metros con referencia del suelo, como se muestra la **Figura 12**, (a) con la antenna direccionada hacia el frente, (b) con antenna direccionada hacia el lado derecho y (c) con la antenna direccionada hacia atrás.

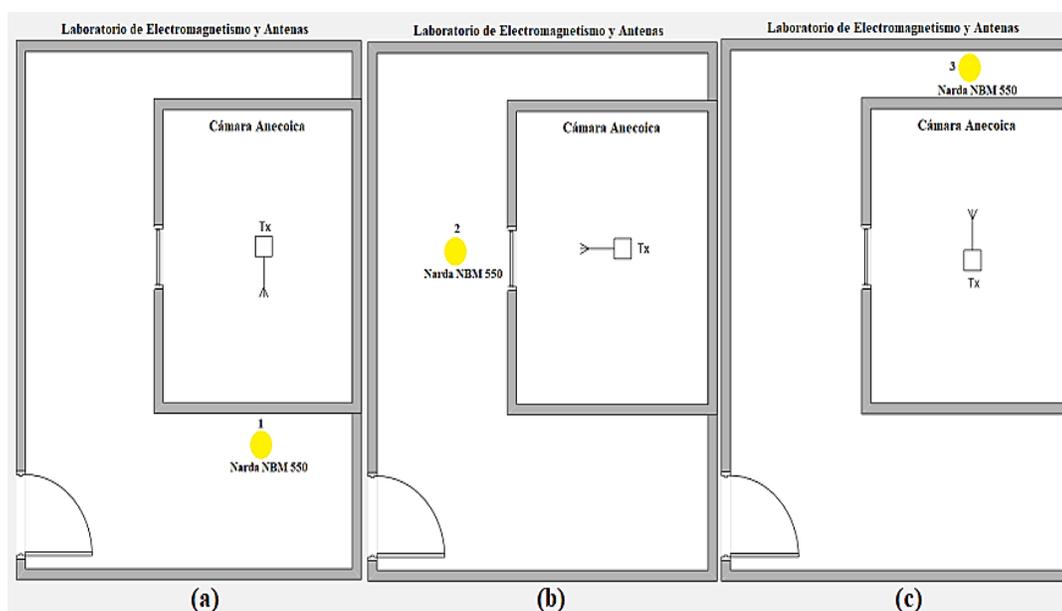


Figura 12. Mediciones Fuera de la Cámara Anecoica..

Se realizó dos tipos de mediciones, la primera fue una medición instantánea de campo eléctrico y la segunda un promedio del campo eléctrico captado en el medio ambiente en un tiempo de 2 minutos, ambas con la antenna transmitiendo.

La primera antenna utilizada como transmisora (Tx) fue una antenna micro línea Yagui-Uda de 5 elementos, que trabaja a una frecuencia de 2.4 GHz, la segunda antenna utilizada fue una de micro línea Logarítmica Periódica, que trabaja a una frecuencia de 1 GHz, la tercera antenna utilizada fue una antenna espiral, que trabaja a una frecuencia de 1.5 Ghz, todas transmitiendo a niveles potencia

de 0, 10 15 y 20 dBm, tanto en polarización vertical como horizontal, excepto la antena Espiral que tiene una polarización circular.

3.1.1.2. Mediciones Dentro de la Cámara Anecoica.

De la misma manera como se realizó en la parte exterior se procedió a determinar el nivel de referencia de campo eléctrico, dentro de la cámara anecoica, se realizó una medición promedio del campo eléctrico captado en el medio ambiente en un tiempo de 3 minutos, el medidor Narda NBM 550 fue colocado en tres posiciones como fueron: la parte de la antena, medio y en la parte posterior, a una altura de 1.3 metros con referencia al suelo, tal como se muestra la **Figura 13**.

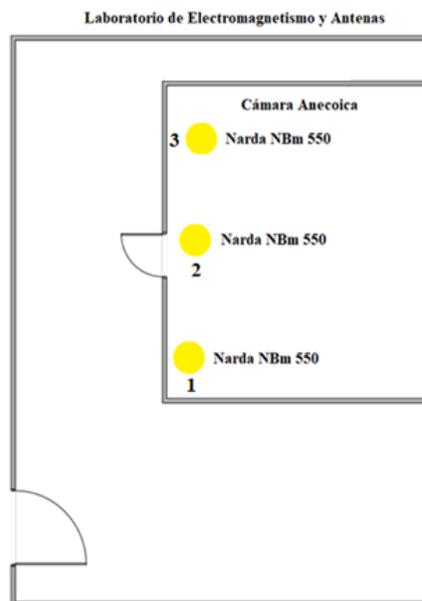


Figura 13. Posición del Medidor dentro de la Cámara Anecoica.

De la misma manera como en la parte externa, se realizó las mediciones con las mismas antenas de transmisión sin variar ningún parámetro como frecuencia, nivel de potencia, direccionamiento, polarización, altura del medidor o el tiempo promedio de medición del campo eléctrico. El medidor Narda NBM 550 fue ubicado de igual forma en tres posiciones, a una altura de 1.3 metros con referencia del suelo, como se muestra la **Figura 14**.

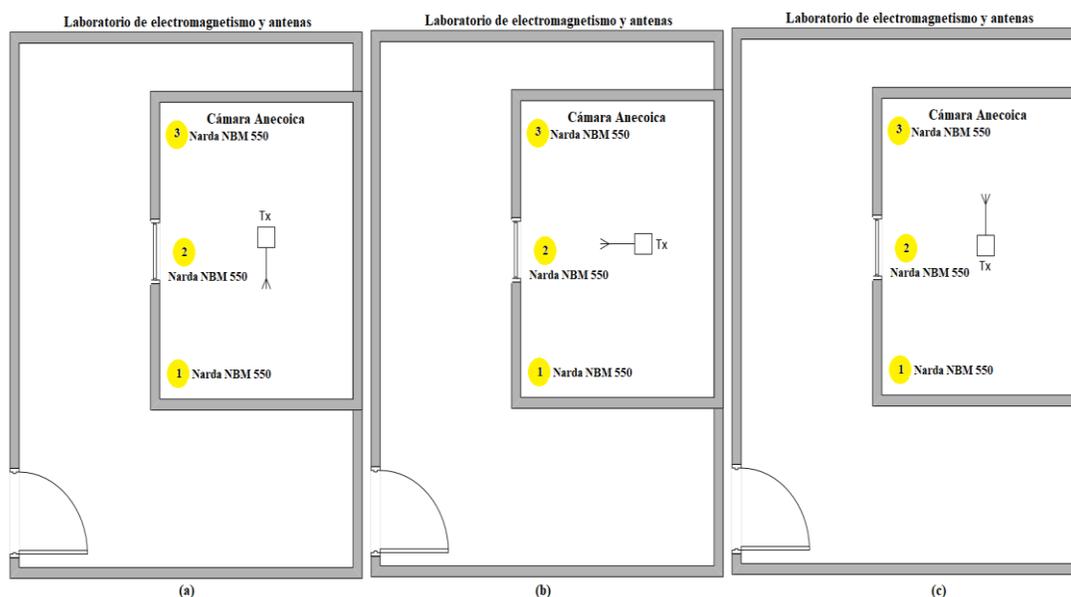


Figura 14. Ubicación del Medidor Narda NBM 550 dentro de la cámara anecoica.

3.1.2. Valoración mediante la medición de un Patrón de Radiación.

Para realizar una valoración de la funcionalidad de la cámara anecoica, mediante la medición de un patrón de radiación, lo que se tomó en cuenta principalmente fue la similitud del diagrama del patrón de radiación medición con los diagramas teóricos, además de obtener repetitividad en el resultado de las mediciones.

El equipo con el cual se realizó las mediciones del patrón de radiación tanto fuera dentro de la cámara anecoica fue el Sistema de Entrenamiento de Ondas y Antenas WATS-2002, por sus siglas en inglés (Wave and Antenna Training System). Es un equipo que permite obtener la medición del patrón de radiación de un entorno móvil, debido a que, cuenta con un motor que gira 360 grados en pasos de 0.9 grados a la antena que funciona como receptora. Las mediciones son receptadas por el software el cual va dibujando el patrón de radiación según los puntos de giro de la antena. Como se muestra en la **Figura 15.** (Equipment Test;).

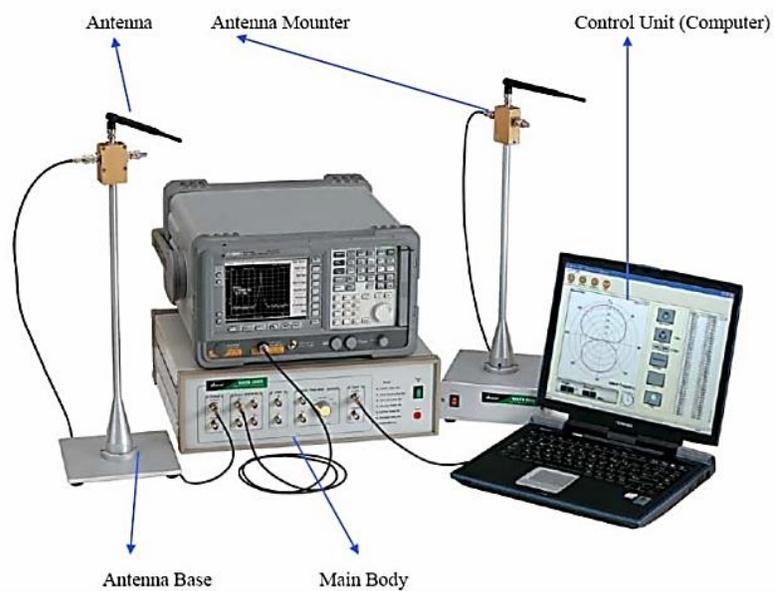


Figura 15. Equipo de medición WATS-2002
Fuente: (Equipment Test;)

Las mediciones se realizaron en la parte exterior y en parte interior de la cámara anecoica, con el uso de dos antenas Yagui-Uda de igual características, a una frecuencia de trabajo de 2.45 GHz, tanto en polarización Vertical como Horizontal. Se realizaron varias mediciones hasta llegar a obtener una simetría y repetitividad en la graficas del patrón de radiación, además de una similitud a la teórica.

3.2. Medición de los Parámetros de Antenas.

El principal parámetro de estudio de una antena es la ganancia, dicho parámetro fue medido utilizando métodos de mediciones indirectos como son el análisis comparativo de dos y tres antenas. El parámetro de directividad, relación frente a espalda, ancho de haz de nulo a nulo fueron determinados a través de la medición de los patrones de radiación obtenidos de cada antena en la cámara anecoica. El resto de parámetros se obtuvieron con el uso de instrumentos de medición del Laboratorio de Electromagnetismo y Antenas.

3.2.1. Método de Dos Antenas.

La metodología de medición de dos antenas, se aplicó de dos formas, la primera es con el uso de dos equipos de medición, el primero un generador de señales que se encuentra conectado a la antena de transmisión, en el cual se define el nivel de potencia y la frecuencia en la cual se va a transmitir, y el segundo un analizador de espectros conectado a la antena de recepción, el cual mide el nivel de potencia recibida, como se observa en la **Figura 16**.

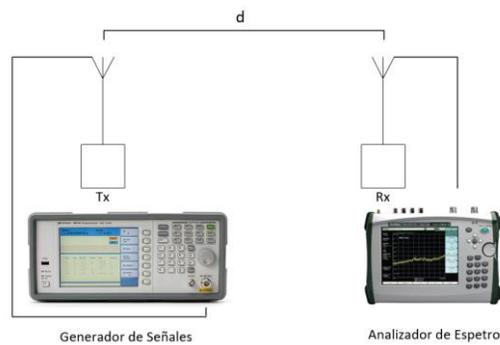


Figura 16. Medición de la ganancia de antena utilizando dos equipos.

Cabe recalcar que solo se puede aplicar este tipo de metodología si se cuenta con dos antenas de las mismas características, al cumplir con este requisito entonces se puede hacer uso de la **Ecuación (1)**, igualando la ganancia de la antena de transmisión a la de recepción, de la siguiente manera:

$$G = G_{antTx} = G_{antRx}$$

Entonces:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{antTx} + G_{antRx} - L_b - L_{cables\ y\ conectores}$$

$$P_{rx} = P_{tx} + 2G - L_b - L_{cables\ y\ conectores}$$

$$2G = P_{rx} - P_{tx} + L_b + L_{cables\ y\ conectores}$$

$$G = \frac{P_{rx} - P_{tx} + L_b + L_{cables\ y\ conectores}}{2} \quad (8)$$

La segunda forma de aplicar el método de dos antenas, sin tener la restricción que sean idénticas es mediante el uso de un solo equipo como es un analizador de redes. El parámetro que se mide al aplicar esta metodología es uno de los Parámetros de Dispersión “S”, específicamente el S_{21} , denominado coeficiente de transmisión directa o ganancia con la tensión directa, como se muestra en la **Figura 17**.

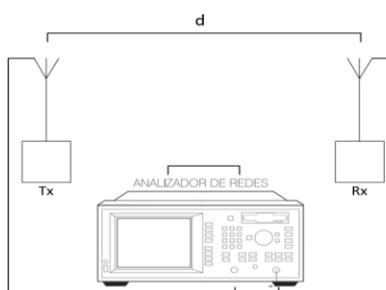


Figura 17. Medición de la ganancia de antena utilizando un Analizador de Redes

Los parámetros de Dispersión o Parámetros S son los coeficientes de reflexión y transmisión una onda incidente y una onda reflejada en una red de dos puertos. En este caso en particular se define a la antena de transmisión como el puerto uno y a la antena de recepción como el puerto dos, de tal manera que el parámetro S_{21} , resultaría ser la potencia en la antena de recepción que es entregada por la antena de transmisión. (Theory, s.f.).

En una red de dos puertos existen varias definiciones que son considerablemente utilizadas para definir la ganancia de potencia, como son la ganancia de transductor GT, la ganancia de potencia disponible Ga, y la ganancia de potencia o ganancia de operación Gp, de las cuales la medida de ganancia más importante es la ganancia del transductor GT, debido a que relaciona los parámetros del puerto uno como es del generador y del puerto dos como es la carga, para nuestro caso de la antena de transmisión y de recepción de la siguiente manera: (Niknejad)

$$GT = \frac{P_{carga}}{P_{generador}} = \frac{P_{Rx}}{P_{Tx}} \quad (9)$$

Como los dos puertos se encuentran conectados a una fuente y carga con la impedancia Z_0 , entonces se puede afirmar que:

$$GT = |S_{21}^2| = \frac{P_{Rx}}{P_{Tx}} \quad (10)$$

Entonces llevando la expresión a dB, se tiene:

$$S_{21} = \sqrt{\frac{P_{Rx}}{P_{Tx}}}$$

$$10\log(S_{21}^2) = 10\log\left(\frac{P_{Rx}}{P_{Tx}}\right)$$

$$20\log(S_{21}) = 10\log\left(\frac{P_{Rx}}{P_{Tx}}\right)$$

$$20\log(S_{21}) = 10\log(P_{Rx}) - 10\log(P_{Tx})$$

$$S_{21} = P_{Rx} - P_{Tx} [dB] \quad (11)$$

Reemplazando en la **Formula 8**, se obtiene la segunda expresión para determinar la ganancia de una antena a través del parámetro S_{21} .

$$G = \frac{S_{21} + L_b + L_{cables\ y\ conectores}}{2} \quad (12)$$

3.2.2. Método de Tres antenas.

En la metodología de medición de tres antenas se realiza tres mediciones, tal como se muestra en la **Figura 18**. El equipo que se utilizó para realizar las mediciones fue el Analizador de Redes.

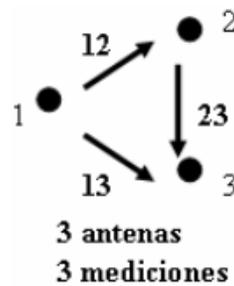


Figura 18. Método de Tres Antenas.

A diferencia del método de dos antenas, en el cual las antenas utilizadas debían tener las mismas características, al aplicar el método de tres antenas ya no existe esta restricción, se puede utilizar tres antenas diferentes, razón por lo cual se tendría un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas, siendo estas las ganancias de las antenas. El sistema de ecuaciones mencionado se resolvió utilizando matrices de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} G_{ant1} \\ G_{ant2} \\ G_{ant3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & -0.5 \\ 0.5 & -0.5 & 0.5 \\ -0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{12} \\ M_{13} \\ M_{23} \end{bmatrix}$$

Donde: G_{ant1} , es la Ganancia de la antena 1, G_{ant2} , es la Ganancia de la antena 2, G_{ant3} , es la Ganancia de la antena 3, M_{12} , es la Medición de S_{21} entre la Antena 1 y la Antena 2 $+L_b + L_{cables\ y\ conectores}$, M_{13} , es la Medición de S_{21} entre la Antena 1 y la Antena 3 $+L_b + L_{cables\ y\ conectores}$, M_{23} , es la Medición de S_{21} entre la Antena 2 y la Antena 3 $+L_b + L_{cables\ y\ conectores}$.

Al resolver el sistema de ecuación se despeja las tres incógnitas, las cuales son las ganancias de las antenas, de la siguiente manera: (Medina Monroy, Díaz Tapia, Olvera Cervantes, Chávez Pérez, & Velázquez Ventura, 2008)

$$G_{ant1} = \frac{M_{12} + M_{13} - M_{23} + L_b + L_{cables\ y\ conectores}}{2} \quad (13)$$

$$G_{ant2} = \frac{M_{12} - M_{13} + M_{23} + L_b + L_{cables\ y\ conectores}}{2} \quad (14)$$

$$G_{ant3} = \frac{-M_{12} + M_{13} + M_{23} + L_b + L_{cables\ y\ conectores}}{2} \quad (15)$$

De esta manera con las Ecuaciones (13), (14) y (15), se determinaron las ganancias de las antenas utilizadas para el proyecto de investigación, como un tercer método de medición.

CAPITULO IV

SIMULACIÓN

En el presente capítulo se va a detallar el software utilizado para realizar las simulaciones de las antenas con las cuales se realizaron las mediciones. Como primer lugar se da una descripción breve del software, sus características y funcionamiento, a continuación, se explica el procedimiento para realizar la simulación, y por último se presenta el resultado de las diferentes antenas simuladas.

4.1. Computer Simulation Technology (CST) Studio Suite.

CST Studio Suite fue el software utilizado para realizar las simulaciones de las antenas, debido a que cuenta con un paquete completo de herramientas para diseñar y analizar y optimizar, componentes electromagnéticos. Las tres características principales del software son la velocidad de procesamiento, la precisión y la facilidad de operación, debido a que presenta una interfaz que resulta muy amigable para el usuario, como se muestra en la **Figura 19**.

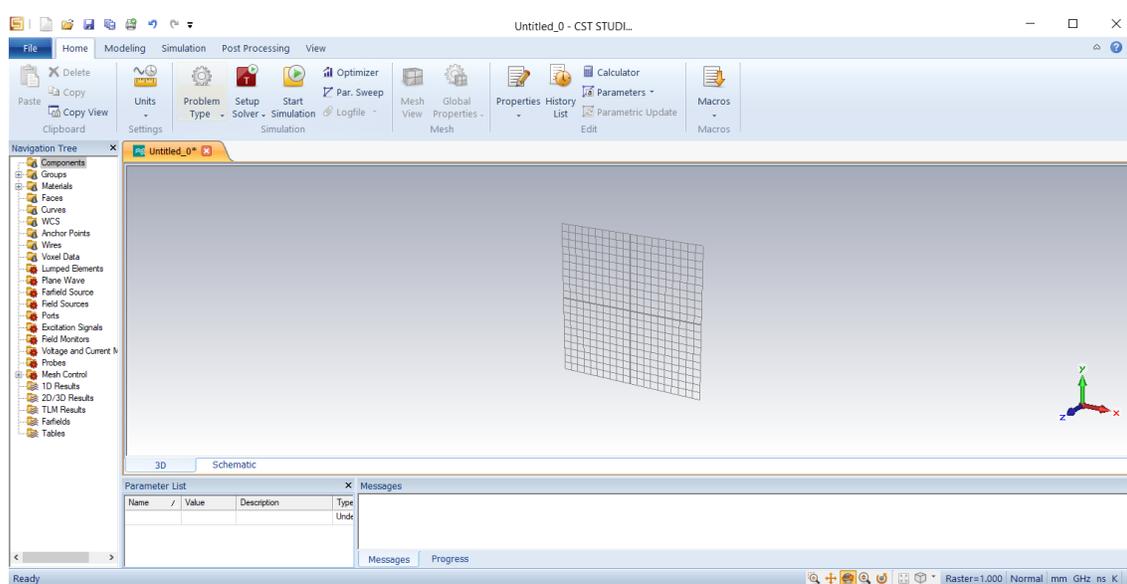


Figura 19. CST Studio Suite.

Al contar con estas tres características fundamentales, CST Studio Suite se ha convertido en uno de los programas más usados últimamente por ingenieros, diseñadores e investigadores. Los campos de trabajo en los cuales se encuentra trabajando el software son por ejemplo en Radio Frecuencia, Microondas, Óptica, Electrónica y Compatibilidad electromagnética entre otros. (Dassault Systemes Cmpany, 2017).

4.2. Simulación de Antenas.

Para poder realizar la simulación de una antena en el software CST se puede seguir los siguientes pasos:

- ❖ Abrir el software de simulación y dar clic en crear un proyecto nuevo, enseguida se despliega una ventana como se muestra en la **Figura 20**, donde se escoge la opción MW & Rf Otical – Antennas.

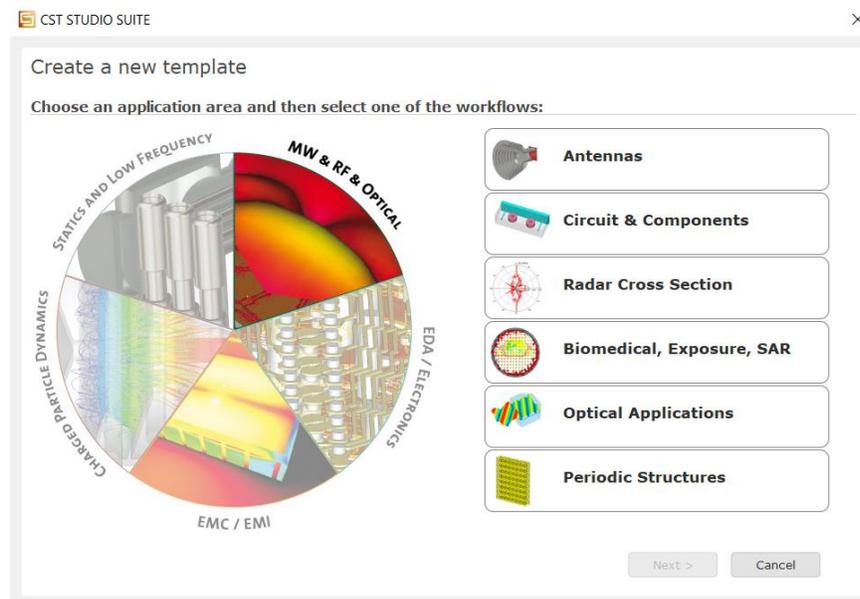


Figura 20. Nuevo Proyecto CST

- ❖ Se despliega otra ventana con diferentes tipos de antenas para simular, la cual se escogerá dependiendo los requerimientos de simulación, para el presente caso se escoge la segunda

opción que corresponde a Antenas Planas como se muestra **Figura 21**.

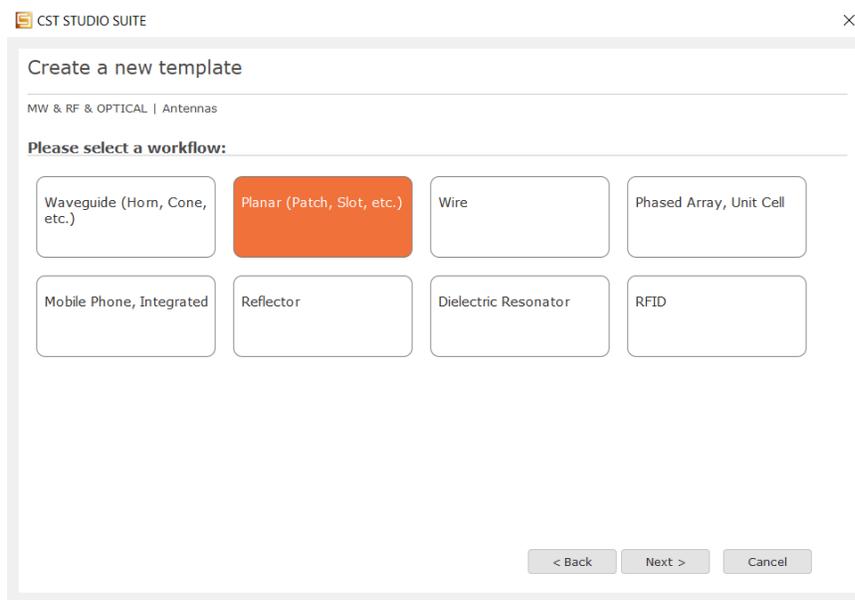


Figura 21. Simulación de Antenas Planas

- ❖ A continuación, se despliega otra ventada en la cual se debe escoger si la simulación se va a realizar en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia según sean los requerimientos, como se muestra en la **Figura 22**.

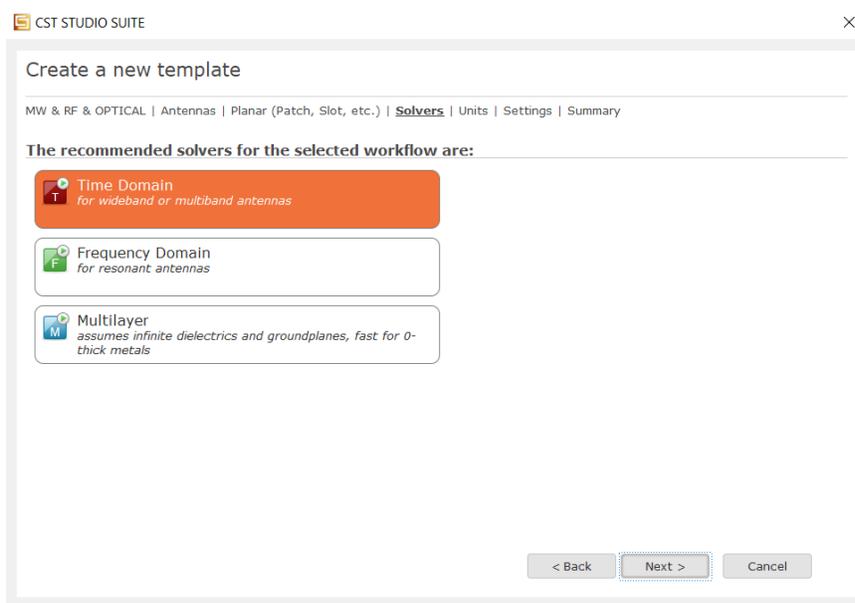


Figura 22. Simulación en el Dominio del Tiempo o Frecuencia

- ❖ En la siguiente ventana se muestra las unidades de las variables que intervienen en el proceso de simulación, como frecuencia, longitud, voltaje, temperatura, entre otras. Como se muestra en la **Figura 23**.

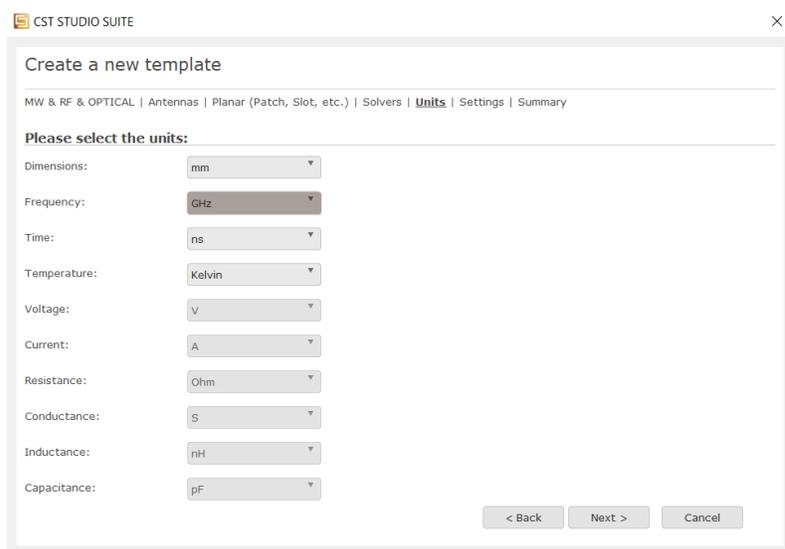


Figura 23. Unidades de las variables de simulación.

- ❖ La siguiente ventana es una configuración del rango de frecuencia en la cual va a funcionar la antena, así como los parámetros que se quiere visualizar en un monitor, como se muestra en la **Figura 24**.

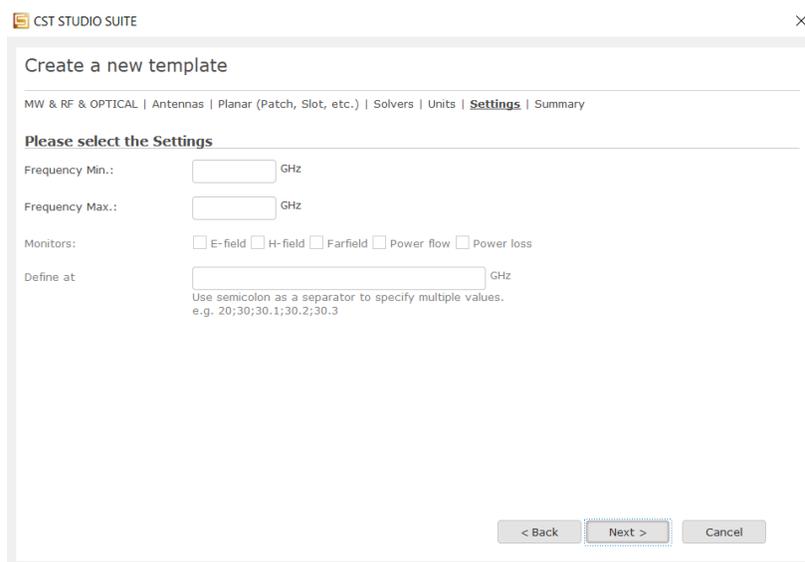


Figura 24. Rango de Frecuencia y Monitores de la Simulación.

- ❖ En la última ventana se presenta un resumen de las configuraciones realizadas anteriormente, además de que se permite cambiar el nombre del archivo de simulación, como se observa en la **Figura 25**.

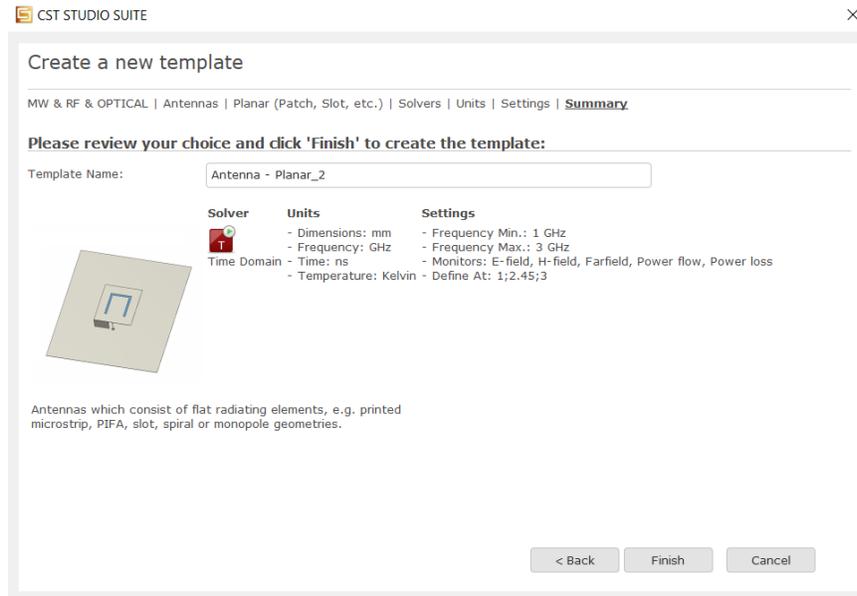


Figura 25. Resumen de los parámetros de simulación.

- ❖ A continuación, se abre la ventana principal del software, en la cual se empieza a insertar los diferentes componentes de la antena. En primer lugar, en la barra de menú, ubicarse en *Modeling*, en *Shapes*, se puede observar diferentes formas geométricas, las cuales serán insertadas para ir construyendo la antena, dependiendo de los requerimientos de forma. Al hacer clic en cualquiera de las formas se despliega una ventana de configuración en la cual se puede definir el valor de las tres dimensiones del sólido escogido, además del tipo de material que se requiere, en este caso en particular puede ser Cobre o Sustrato, como se muestra en la **Figura 26**.

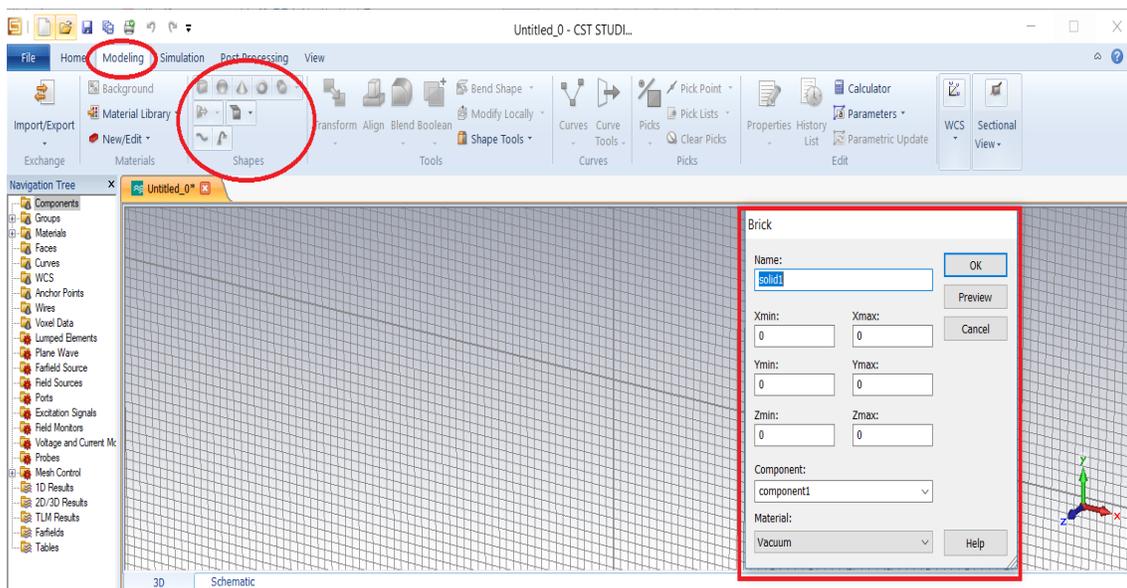


Figura 26. Creación de la Antena.

- ❖ Una vez creado la antena requerida, se procede a añadir la fuente de simulación en la pestaña *Simulation* de la barra de menú y por último en la pestaña *Home* de la barra de menú se da inicio a la simulación, como se observa en la **Figura 27**.

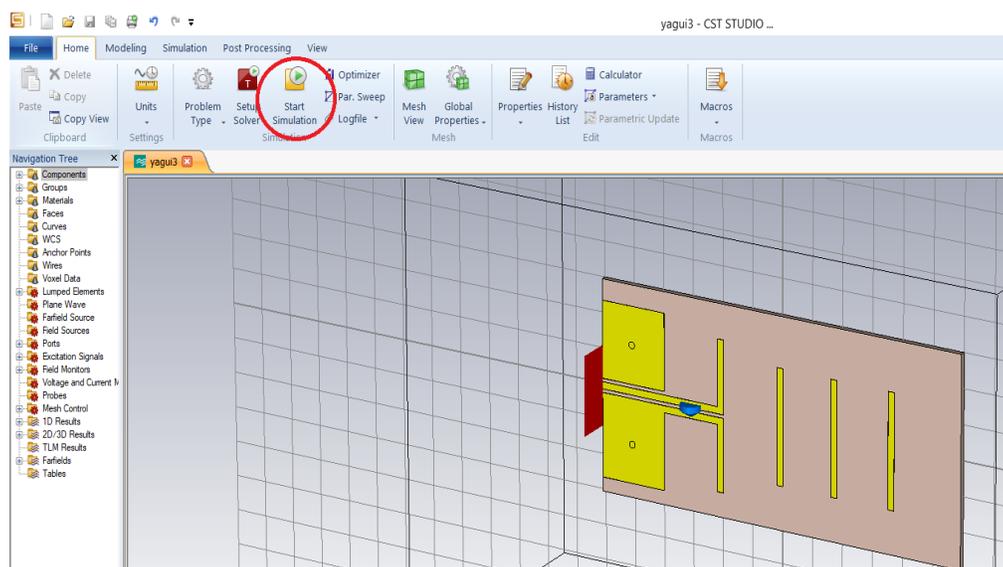


Figura 27. Empezar la simulación de la Antena.

- ❖ Una vez que el programa haya terminado de realizar la simulación de la antena, se puede entonces observar los resultados de la simulación, tales como los Campos Eléctricos y

Magnéticos, así como, el Patrón de Radiación, Ganancia, Directividad, VSWR, entre otros, como se observa en la **Figura 28**.

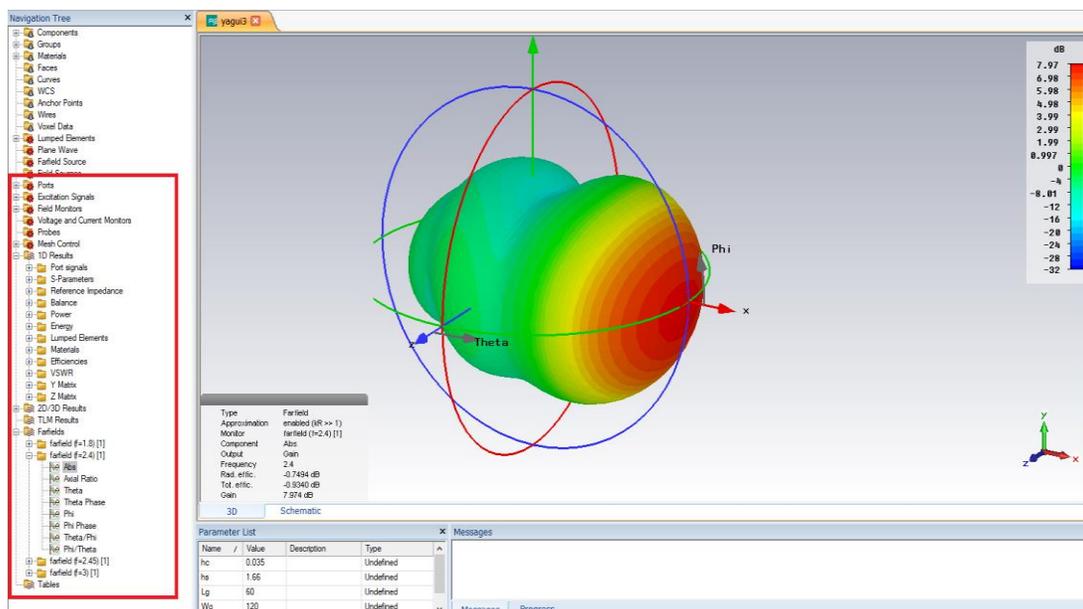


Figura 28. Resultados de la Simulación.

En el desarrollo del proyecto de investigación se utilizó cuatro antenas, las cuales fueron: Yagui-Uda de cinco elementos, Dipolo, Patch de un elemento, y Arreglo Patch de 2*1. Para realizar las simulaciones se tomó en cuenta las consideraciones mostradas en la **Tabla 3**, para las cuatro antenas.

Tabla 3.
Especificaciones de las Antenas.

Frecuencia de Operación	2.45 GHz
Constante del Dieléctrico	4.7 (FR4)
Tangente de Perdidas	0.025
Espesor del Dieléctrico	1.66 mm

Las dimensiones de las antenas y sus elementos fueron medidas cuidadosamente, para ingresar los valores al simulador. A continuación, se presenta los resultados de cada una de las antenas.

4.2.1. Antena Yagui-Uda.

- Esquema

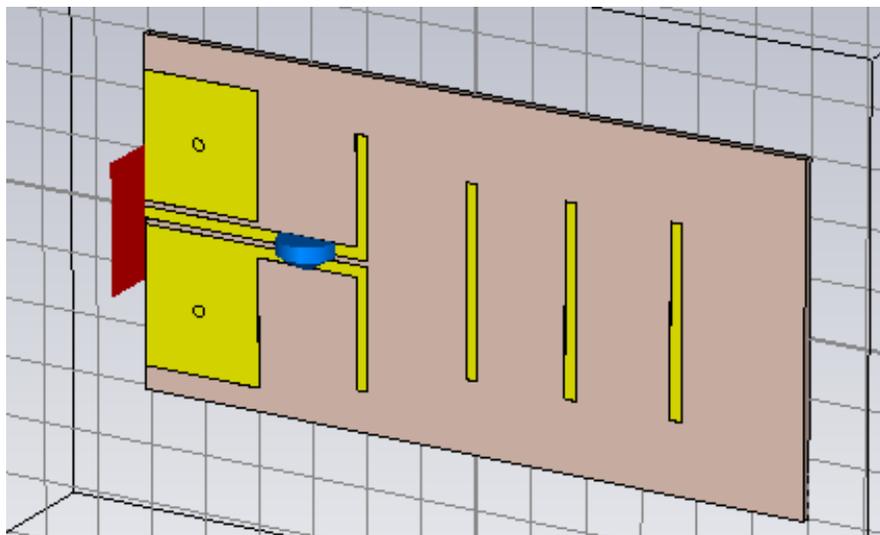


Figura 29. Esquema de la Antena Yagui-Uda

En la **Figura 29**, se presenta el esquema en tres dimensiones de la antena Yagui-Uda de cinco elementos, la placa de la antena tiene un largo de 12 cm y un ancho de 6 cm.

- Coeficiente de Reflexión S_{11}

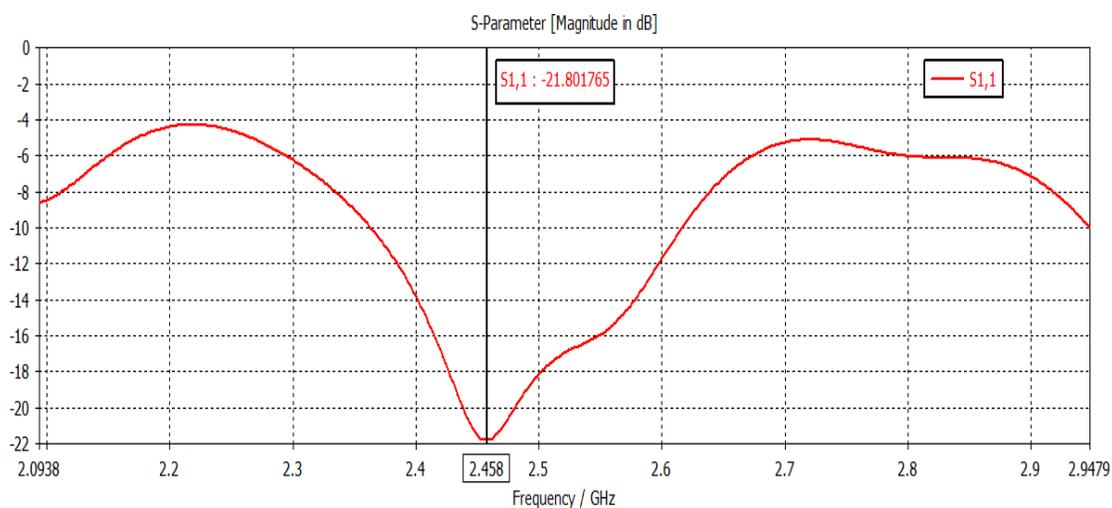


Figura 30. Coeficiente de Reflexión S_{11} de la Antena Yagui-Uda.

En la **Figura 30**, se presenta el coeficiente de reflexión de la antena Yagui-Uda, se observa que presenta un frecuencia de operación de 2.458 GHz, con un valor de S_{11} de -21.802 dB.

- **Relación de onda estacionaria de Voltaje (VSWR)**

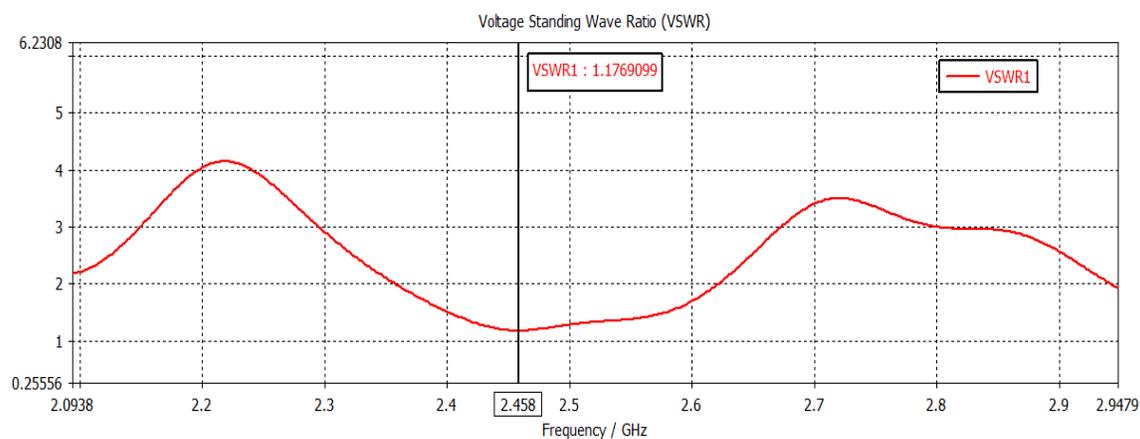


Figura 31. VSWR de la Antena Yagui-Uda

En la **Figura 31**, se presenta un valor de VSWR de la Antena Yagui-Uda, se observa que para la frecuencia de operación de 2.458 GHz, se tiene un valor de 1.176.

- **Patrón de Radiación 3D.**

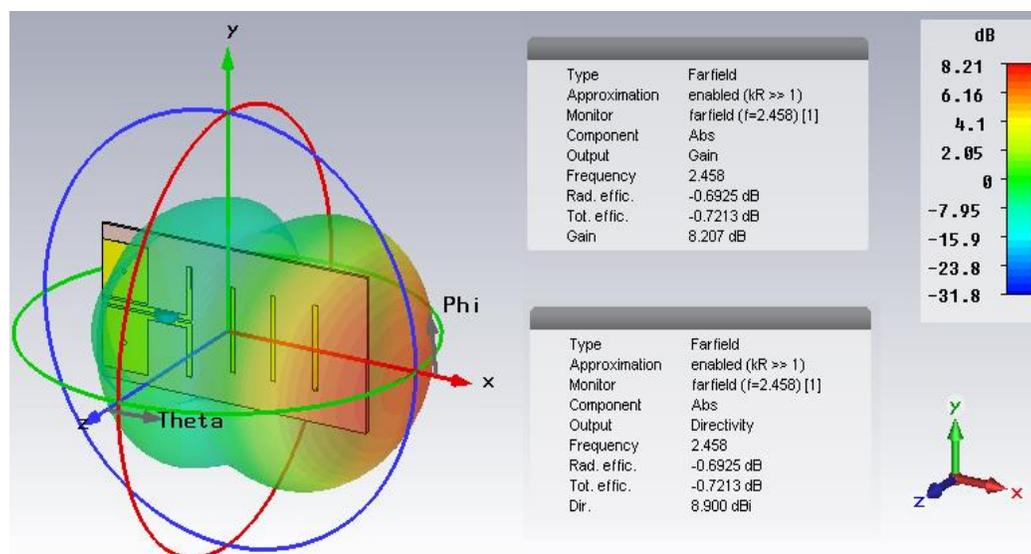


Figura 32. Diagrama de Radiación en 3D de la Antena Yagui-Uda

En la **Figura 32**, se presenta el diagrama del Patrón de Radiación, de la antena en tres dimensiones, además se observa que la antena presenta una Ganancia de 8.207 dB y una

Directividad de 8.9 dBi. Con estos valores se procede a calcular la eficiencia de una antena con la **Ecuación (6)**, de la siguiente manera:

$$G = 8.207 \text{ dB} = 6.617 \text{ adimensional}$$

$$D = 8.9 \text{ dBi} = 7.762 \text{ adimensional}$$

$$G = \eta_r * D$$

$$\eta_r = \frac{G}{D}$$

$$\eta_r = \frac{6.6175}{7.7625}$$

$$\eta_r = 0.852$$

$$\eta_r \% = 85.2 \%$$

- **Patrón de Radiación en Coordenadas polares Plano E**

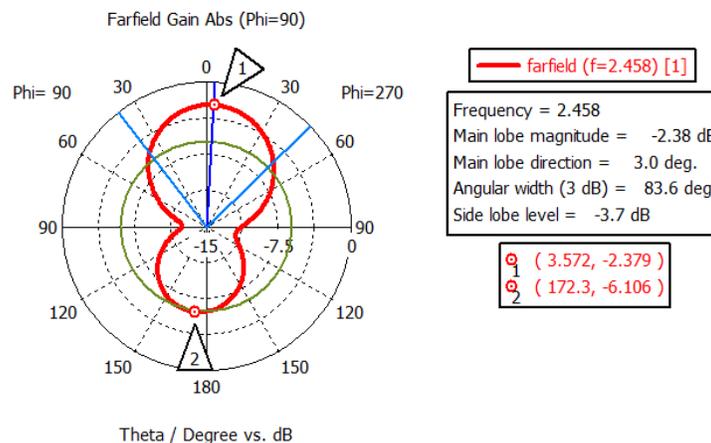


Figura 33. Diagrama de Radiación en Coordenadas Polares, Plano E. Antena Yagui-Uda

En la **Figura 33**, se muestra el diagrama del Patrón de Radiación de la antena Yagui-Uda en coordenadas polares, del Plano E o Polarización Vertical, donde se puede observar el valor del Ancho de haz de media potencia que es 83.6 grados, y mediante los marcadores colocados, se puede calcular la relación Frente Espalda, de la siguiente manera:

$$D/A = -2.379 - (-6.610) = 4.231 \text{ dB}$$

- **Patrón de Radiación en Coordenadas Polares Plano H**

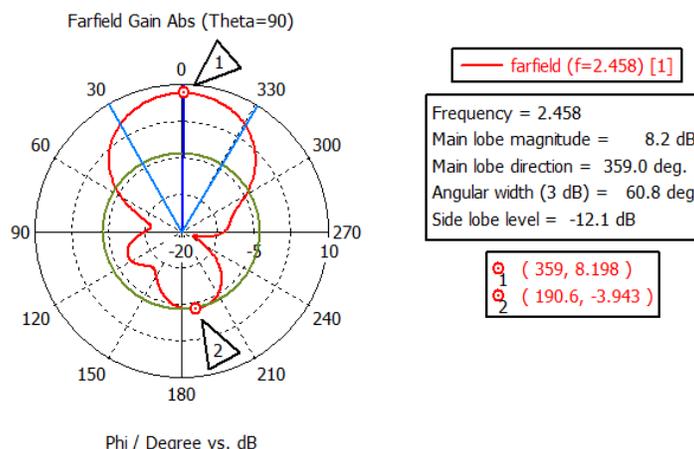


Figura 34. Diagrama de Radiación en Coordenadas Polares, Plano H

En la **Figura 34**, se muestra el diagrama del Patrón de Radiación de la antena Yagui-Uda en coordenadas Polares, del Plano H o Polarización Horizontal, donde se puede observar el valor del Ancho de haz de media potencia que es 60.8 grados, y mediante los marcadores colocados, se puede calcular la relación Frente Espalda, de la siguiente manera:

$$D/A = 8.198 - (-3.943) = 12.141 \text{ dB}$$

En la **Tabla 4**, se presentan los resultados de la simulación de la antena Yagui-Uda.

Tabla 4.

Resultado de la Simulación de la Antena Yagui-Uda.

Frecuencia de Operación	2.45 GHz
Coefficiente de Reflexión S_{11}	-21.802 dB
VSWR	1.1769
Ganancia	8.207 dB / 6.6175 adimensional
Directividad	8.9 dBi / 7.7625 adimensional
Eficiencia	85.2 %
Relación Frente Espalda Plano E D/A	4.231 dB
Relación Frente Espalda Plano H D/A	12.141 dB
Ancho de Haz de Media potencia Plano E FNBW	83.6°
Ancho de Haz de Media potencia Plano H FNBW	60.8°

4.2.2. Antena Dipolo.

- Esquema

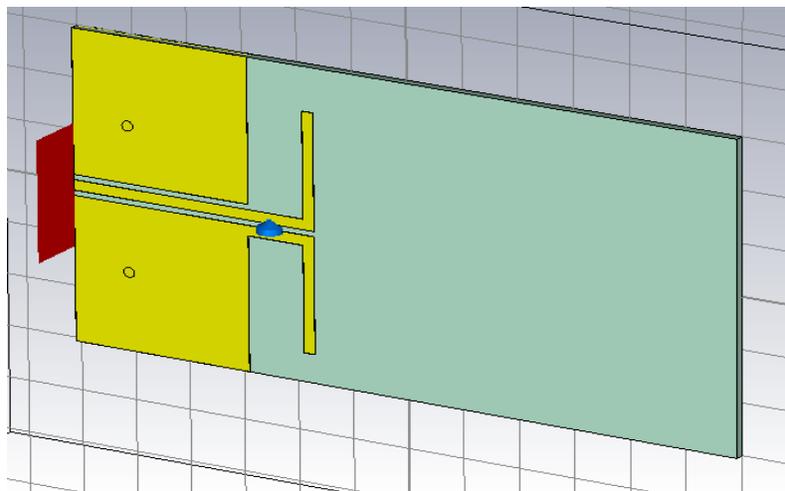


Figura 35. Esquema de la Antena Dipolo

En la **Figura 35**, se presenta el esquema en tres dimensiones de la antena Dipolo, la placa de la antena tiene un largo de 12 cm y un ancho de 6 cm.

- Coeficiente de Reflexión S_{11}

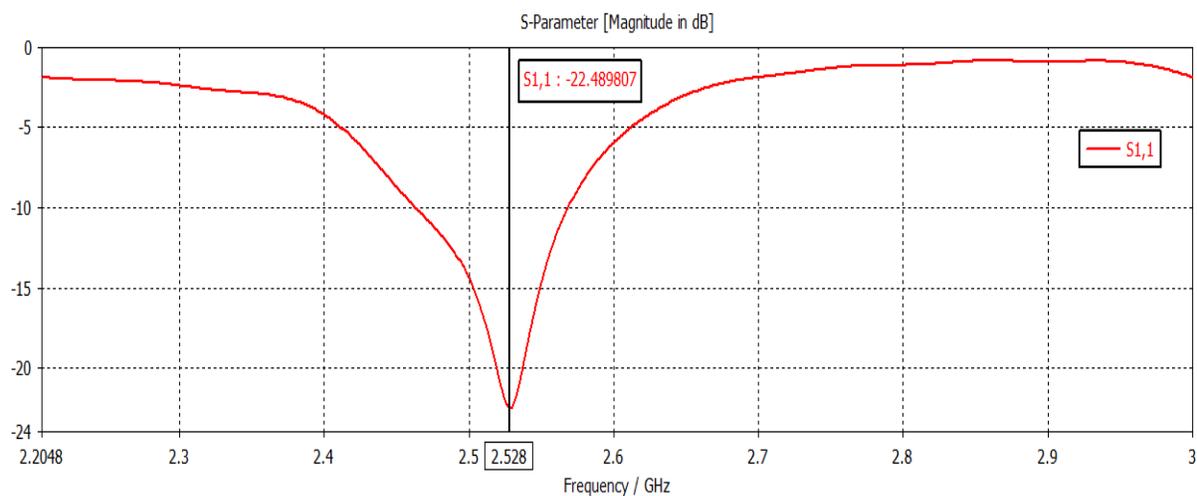


Figura 36. Coeficiente de Reflexión S_{11} de la Antena Dipolo.

En la **Figura 36**, se presenta el coeficiente de reflexión de la antena Dipolo, se observa que presenta un frecuencia de operación de 2.528 GHz, con un valor de S_{11} de -22.489 dB.

- **Relación de onda estacionaria de Voltaje (VSWR)**

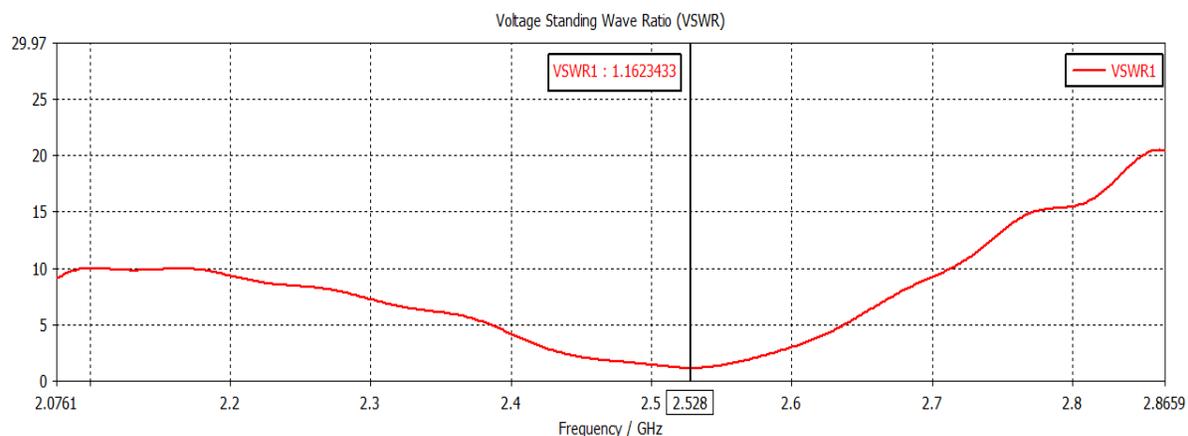


Figura 37. VSWR de la Antena Dipolo

En la **Figura 37**, se presenta un valor de VSWR de la Antena Dipolo, se observa que para la frecuencia de operación de 2.528 GHz, se tiene un valor de 1.162.

- **Patrón de Radiación 3.**

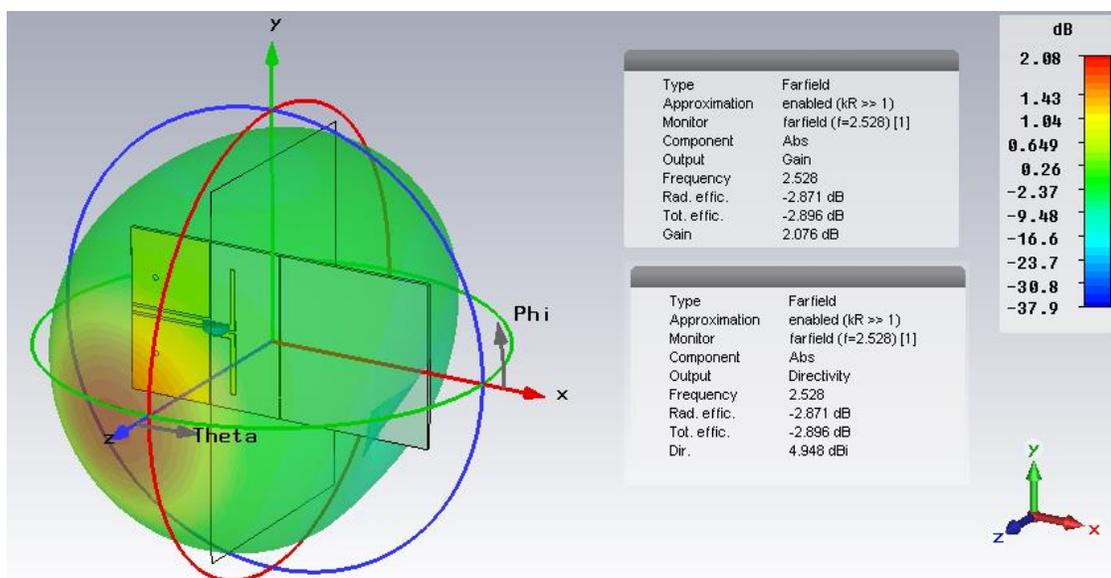


Figura 38. Diagrama de Radiación en 3D de la Antena Dipolo.

En la **Figura 38**, se presenta el diagrama del Patrón de Radiación, de la Antena Dipolo en tres dimensiones, además se observa que la antena presenta una Ganancia de 2.076 dB y una

Directividad de 4.948 dBi. Con estos valores se procede a calcular la eficiencia de una antena con la **Ecuación (6)**, de la siguiente manera:

$$G = 2.076 \text{ dB} = 1.610 \text{ adimensional}$$

$$D = 4.948 \text{ dBi} = 3.124 \text{ adimensional}$$

$$G = \eta_r * D$$

$$\eta_r = \frac{1.6106}{3.1246}$$

$$\eta_r = 0.5155$$

$$\eta_r \% = 51.55 \%$$

- **Patrón de Radiación en Coordenadas polares Plano E**

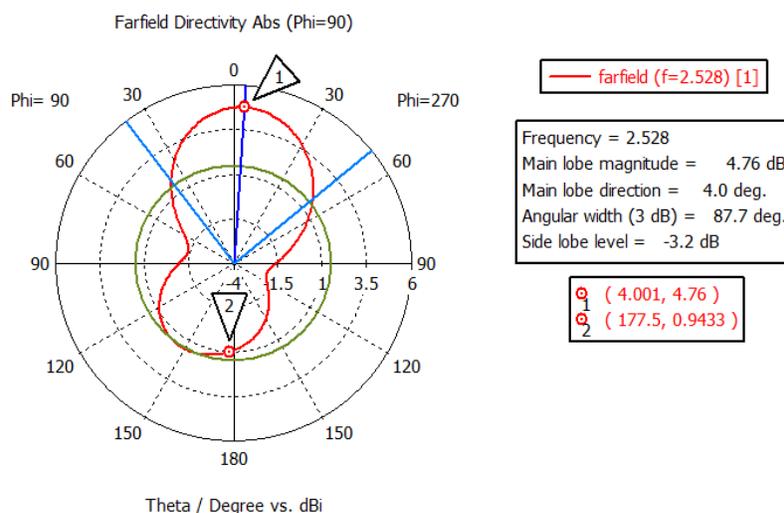


Figura 39. Diagrama de Radiación en Coordenadas Polares, Plano E Antena Dipolo

En la **Figura 39**, se muestra el diagrama del Patrón de Radiación de la antena Dipolo en coordenadas polares, del Plano E o Polarización Vertical, donde se puede observar el valor del Ancho de haz de media potencia que es 87.7 grados, y mediante los marcadores colocados, se puede calcular la relación Frente Espalda, de la siguiente manera:

$$D/A = 4.76 - 0.9433 = 3.817 \text{ dB}$$

- **Patrón de Radiación en Coordenadas Polares Plano H**

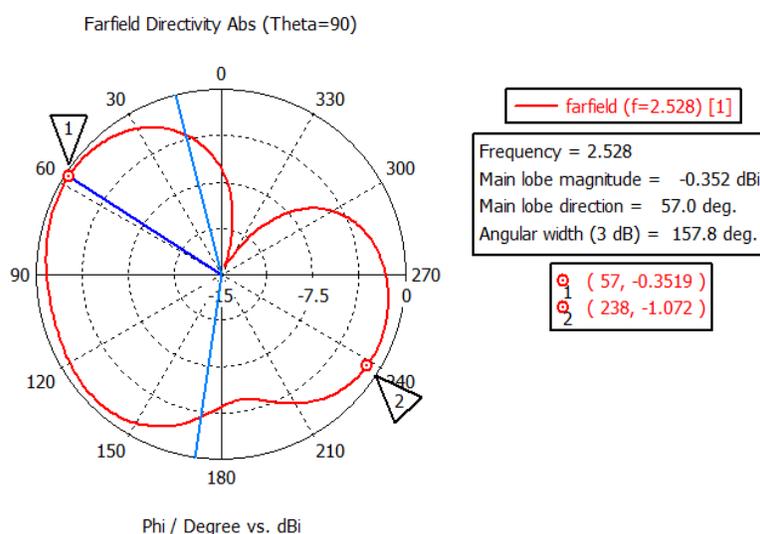


Figura 40. Diagrama de Radiación en Coordenadas Polares, Plano H, Antena Dipolo

En la **Figura 40**, se muestra el diagrama del Patrón de Radiación de la antena Dipolo en coordenadas Polares, del Plano H o Polarización Horizontal, donde se puede observar el valor del Ancho de haz de media potencia que es 157.8 grados, y mediante los marcadores colocados, se puede calcular la relación Frente Espalda, de la siguiente manera:

$$D/A = 8.198 - 3.943 = 4.255dB$$

En la **Tabla 5**, se presentan los resultados de la simulación de la antena Dipolo.

Tabla 5.

Resultado de la Simulación de la Antena Dipolo

Frecuencia de Operación	2.528 GHz
Coefficiente de Reflexión S₁₁	-22.489 dB
VSWR	1.162
Ganancia	2.076 dB / 1.610 adimensional
Directividad	4.948 dBi / 3.124 adimensional
Eficiencia	51.55 %
Relación Frente Espalda Plano E D/A	-8.989 dB
Relación Frente Espalda Plano H D/A	4.255 dB
Ancho de Haz de Media potencia Plano E FNBW	87.7°
Ancho de Haz de Media potencia Plano H FNBW	157.8°

4.2.3. Antena Patch.

- Esquema

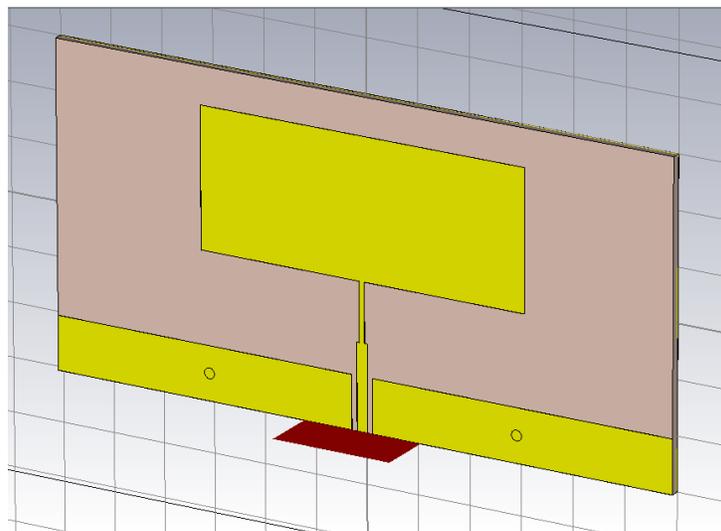


Figura 41. Esquema de la Antena Patch

En la **Figura 41**, se presenta el esquema en tres dimensiones de la antena Patch, la placa de la antena tiene un largo de 12 cm y un ancho de 6 cm.

- Coeficiente de Reflexión S_{11}

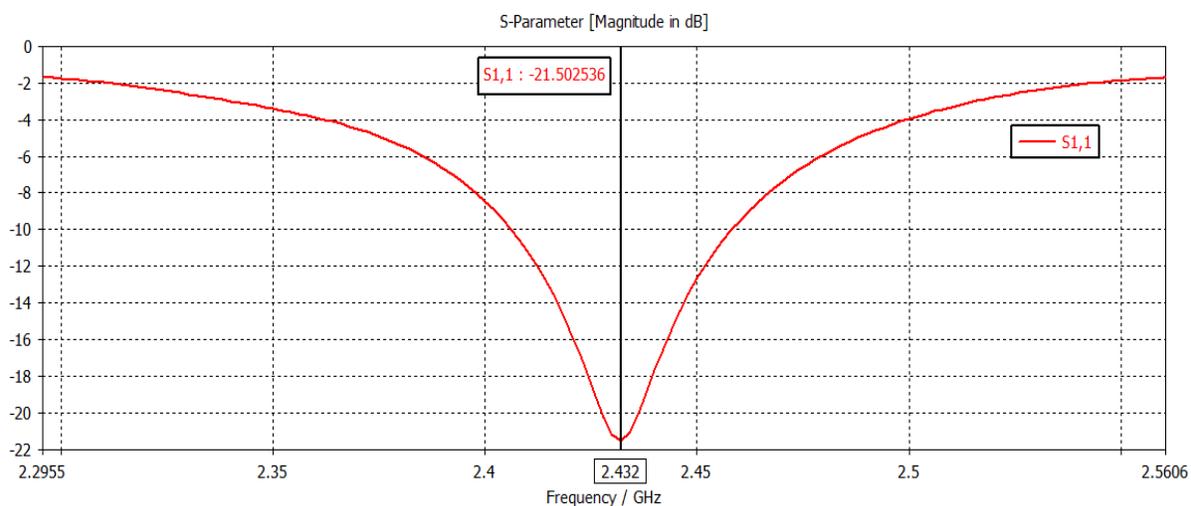


Figura 42. Coeficiente de Reflexión S_{11} de la Antena Patch.

En la **Figura 42**, se presenta el coeficiente de reflexión de la antena Patch, se observa que presenta un frecuencia de operación de 2.432 GHz, con un valor de S_{11} de -21.503 dB.

- **Relación de onda estacionaria de Voltaje (VSWR)**

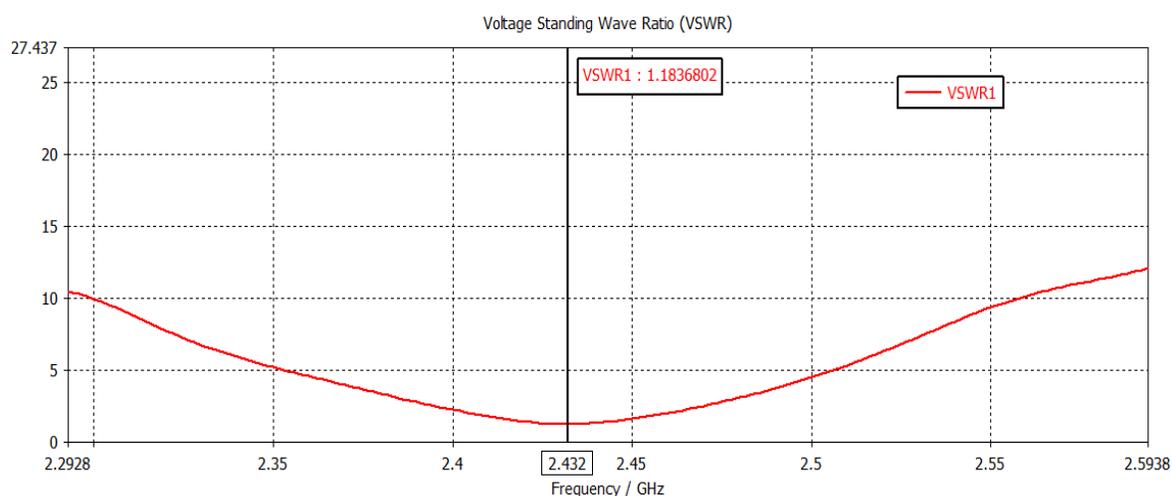


Figura 43. VSWR de la Antena Patch.

En la **Figura 43**, se presenta un valor de VSWR de la Antena Patch, se observa que para la frecuencia de operación de 2.432 GHz, se tiene un valor de 1.184.

- **Patrón de Radiación 3D.**

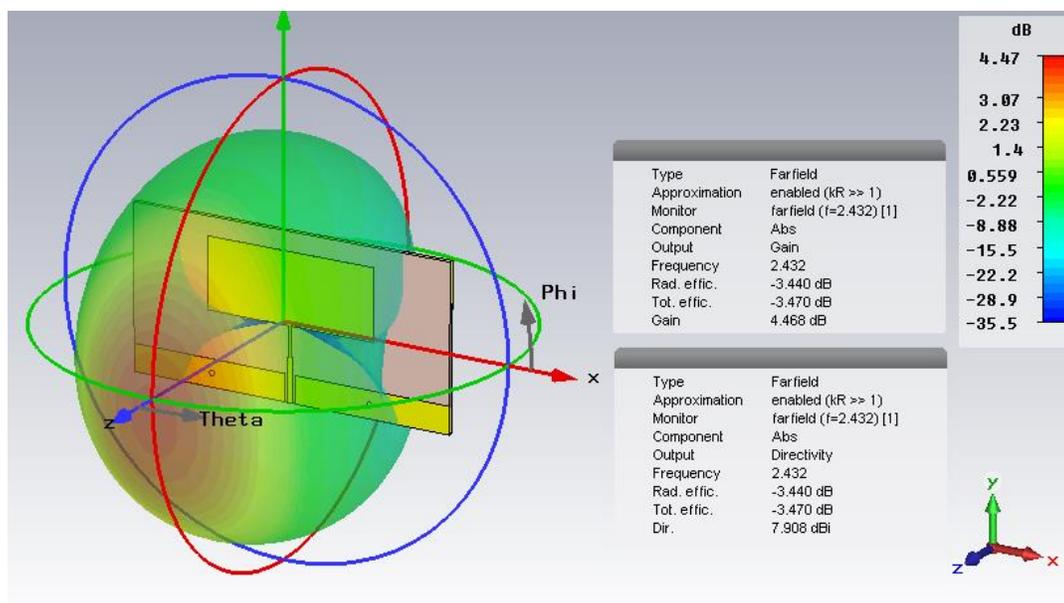


Figura 44. Diagrama de Radiación en 3D de la Antena Patch

En la **Figura 44**, se presenta el diagrama del Patrón de Radiación, de la antena en tres dimensiones, además se observa que la antena presenta una Ganancia de 4.468 dB y una

Directividad de 7.908 dBi. Con estos valores se procede a calcular la eficiencia de una antena con la **Ecuación (6)**, de la siguiente manera:

$$G = 4.468 \text{ dB} = 2.7976 \text{ adimensional}$$

$$D = 7.908 \text{ dBi} = 6.1773 \text{ adimensional}$$

$$G = \eta_r * D$$

$$\eta_r = \frac{2.7976}{6.1773}$$

$$\eta_r = 0.4528$$

$$\eta_r \% = 45.28 \%$$

- **Patrón de Radiación en Coordenadas polares Plano E**

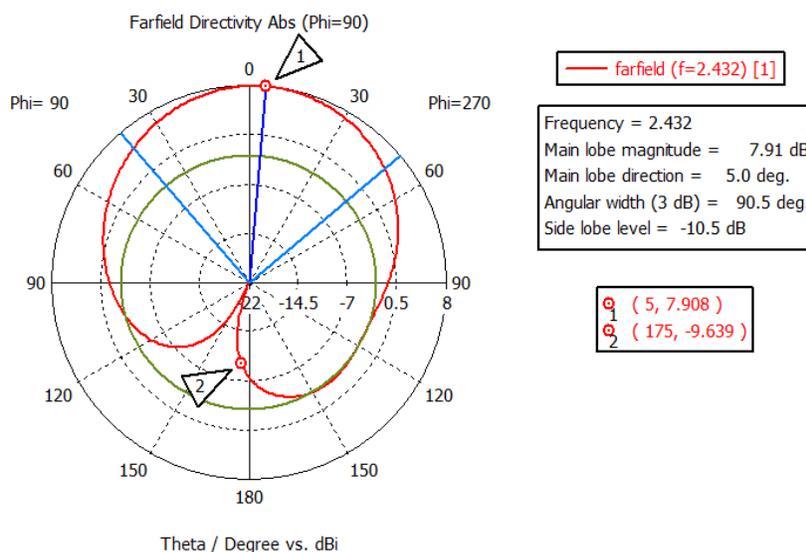


Figura 45. Diagrama de Radiación en Coordenadas Polares, Plano E, Antena Patch.

En la **Figura 45**, se muestra el diagrama del Patrón de Radiación de la antena Patch en coordenadas polares, del Plano E o Polarización Vertical, donde se puede observar el valor del Ancho de haz de media potencia que es 90.5 grados, y mediante los marcadores colocados, se puede calcular la relación Frente Espalda, de la siguiente manera:

$$D/A = 7.908 - (-9.639) = 17.547 \text{ dB}$$

- **Patrón de Radiación en Coordenadas Polares Plano H**

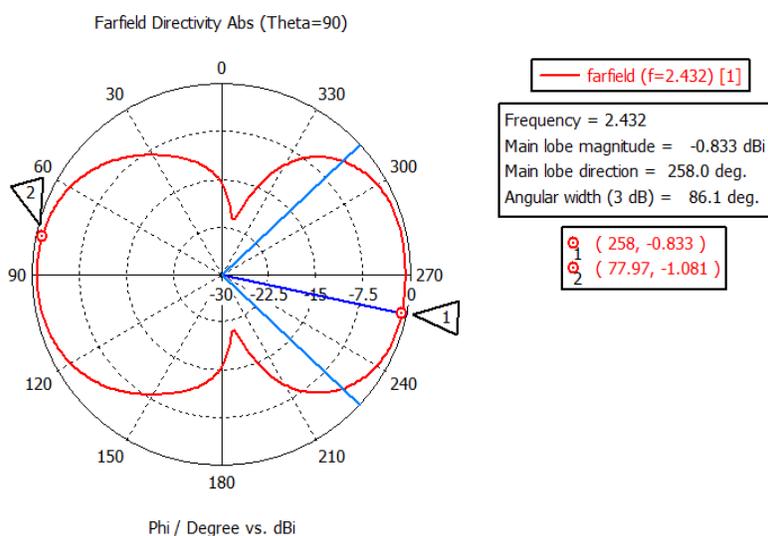


Figura 46. Diagrama de Radiación en Coordenadas Polares, Plano H

En la **Figura 46**, se muestra el diagrama del Patrón de Radiación de la antena Yagui-Uda en coordenadas Polares, del Plano H o Polarización Horizontal, donde se puede observar el valor del Ancho de haz de media potencia que es 86.1 grados, y mediante los marcadores colocados, se puede calcular la relación Frente Espalda, de la siguiente manera:

$$D/A = -0.833 - (-1.981) = 0.248dB$$

En la **Tabla 6**, se presentan los resultados de la simulación de la antena Yagui-Uda.

Tabla 6.

Resultado de la Simulación de la Antena Patch.

Frecuencia de Operación	2.432 GHz
Coefficiente de Reflexión S₁₁	-21.503 dB
VSWR	1.184
Ganancia	4.468 dB / 2.7976 adimensional
Directividad	7.908 dBi / 6.1773 adimensional
Eficiencia	45.28 %
Relación Frente Espalda Plano E D/A	17.547 dB
Relación Frente Espalda Plano H D/A	0.248 dB
Ancho de Haz de Media potencia Plano E FNBW	90.5°
Ancho de Haz de Media potencia Plano H FNBW	86.1°

4.2.4. Antena Arreglo Patch 2x1.

- Esquema

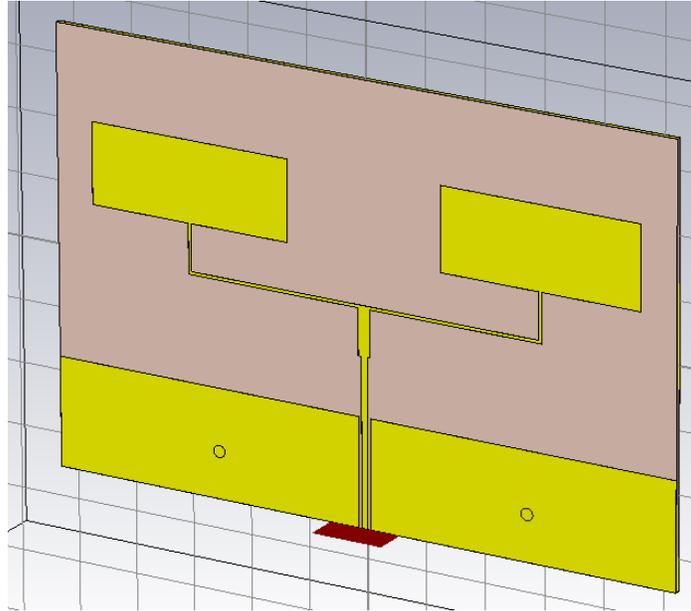


Figura 47. Esquema de la Antena Arreglo Patch 2x1.

En la **Figura 47**, se presenta el esquema en tres dimensiones de la antena Yagui-Uda de cinco elementos, la placa de la antena tiene un largo de 12 cm y un ancho de 6 cm.

- Coeficiente de Reflexión S_{11}

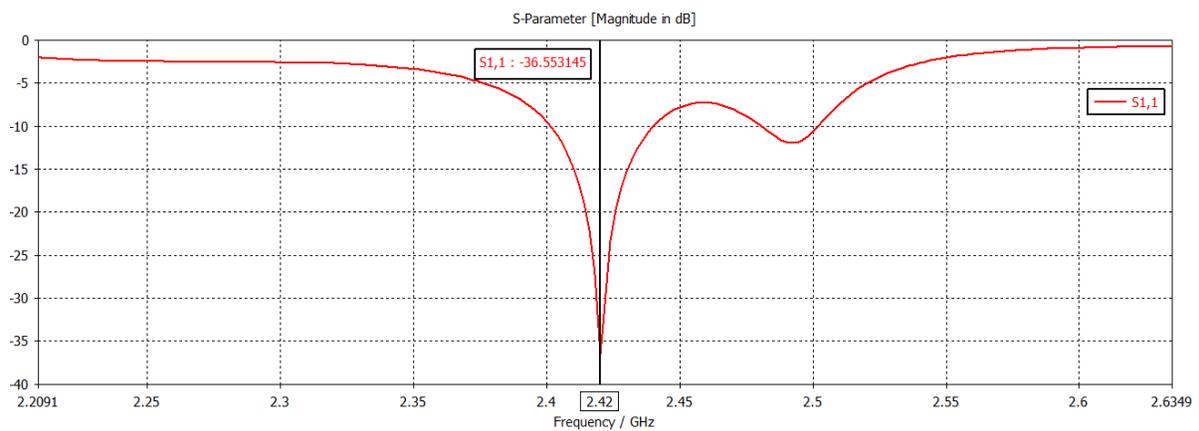


Figura 48. Coeficiente de Reflexión S_{11} de la Antena Arreglo Patch 2x1.

En la **Figura 48**, se presenta el coeficiente de reflexión de la antena Yagui-Uda, se observa que presenta un frecuencia de operación de 2.42 GHz, con un valor de S_{11} de -36.553 dB.

- **Relación de onda estacionaria de Voltaje (VSWR)**

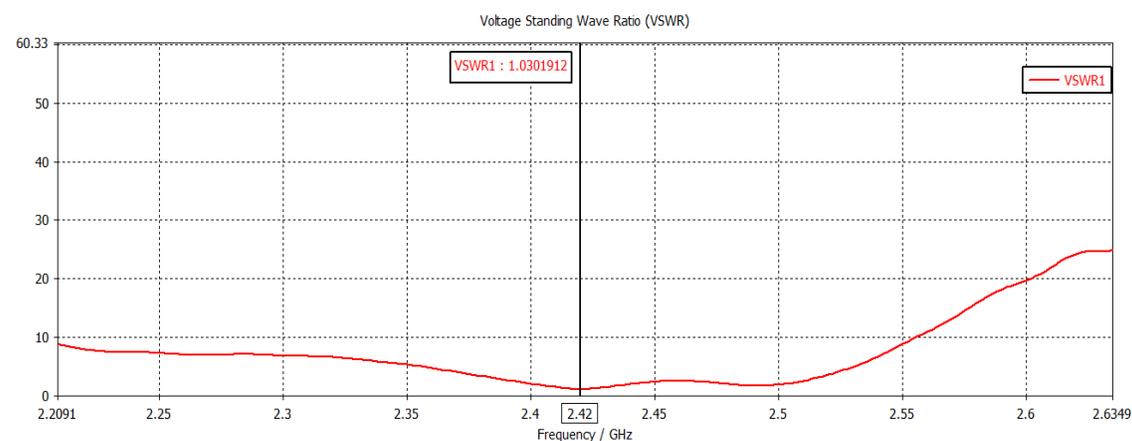


Figura 49. VSWR de la Antena Arreglo Patch 2x1.

En la **Figura 49**, se presenta un valor de VSWR de la Antena Yagui-Uda, se observa que para la frecuencia de operación de 2.42 GHz, se tiene un valor de 1.030.

- **Patrón de Radiación 3D.**

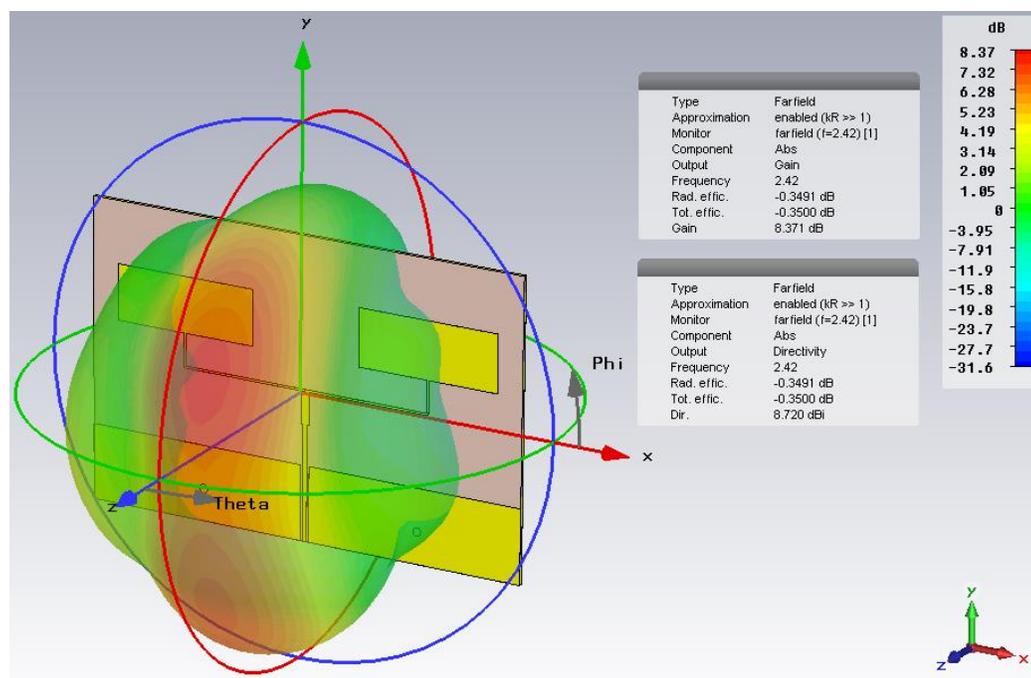


Figura 50. Diagrama de Radiación en 3D de la Antena Arreglo Patch 2x1.

En la **Figura 50**, se presenta el diagrama del Patrón de Radiación, de la antena en tres dimensiones, además se observa que la antena presenta una Ganancia de 8.371 dB y una

Directividad de 8.720 dBi. Con estos valores se procede a calcular la eficiencia de una antena con la **Ecuación (6)**, de la siguiente manera:

$$G = 8.371 \text{ dB} = 6.8722 \text{ adimensional}$$

$$D = 8.720 \text{ dBi} = 7.4473 \text{ adimensional}$$

$$G = \eta_r * D$$

$$\eta_r = \frac{6.8722}{7.4473}$$

$$\eta_r = 0.9234$$

$$\eta_r \% = 92.34 \%$$

- **Patrón de Radiación en Coordenadas polares Plano E**

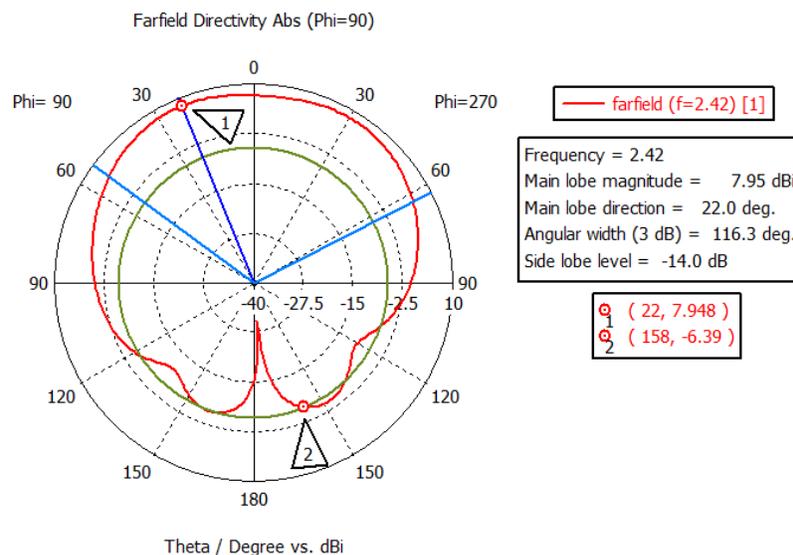


Figura 51. Diagrama de Radiación en Coordenadas Polares, Plano E, Arreglo Patch 2x1.

En la **Figura 51**, se muestra el diagrama del Patrón de Radiación de la antena Arreglo Patch en coordenadas polares, del Plano E o Polarización Vertical, donde se puede observar el valor del Ancho de haz de media potencia que es 116.3 grados, y mediante los marcadores colocados, se puede calcular la relación Frente Espalda, de la siguiente manera:

$$D/A = 7.948 - -(6.39) = 14.338 \text{ dB}$$

- **Patrón de Radiación en Coordenadas Polares Plano H**

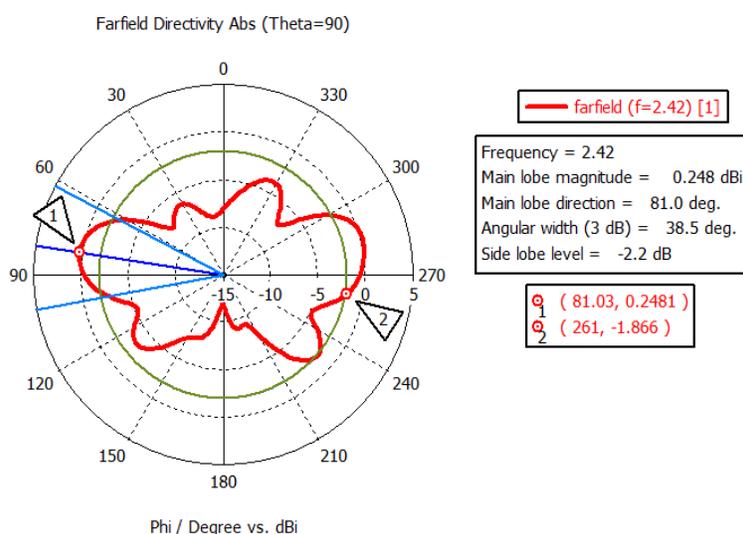


Figura 52. Diagrama de Radiación en Coordenadas Polares, Plano H, Arreglo Patch 2x1

En la **Figura 52**, se muestra el diagrama del Patrón de Radiación de la antena Arreglo Patch en coordenadas Polares, del Plano H o Polarización Horizontal, donde se puede observar el valor del Ancho de haz de media potencia que es 38.5 grados, y mediante los marcadores colocados, se puede calcular la relación Frente Espalda, de la siguiente manera:

$$D/A = 0.248 - (-1.866) = 2.114dB$$

En la **Tabla 7**, se presentan los resultados de la simulación de la antena Arreglo Patch.

Tabla 7.

Resultado de la Simulación de la Antena Arreglo Patch 2x1.

Frecuencia de Operación	2.42 GHz
Coefficiente de Reflexión S₁₁	-36.553 dB
VSWR	1..30
Ganancia	8.371 dB / 6.8722 adimensional
Directividad	8.72 dBi / 7.4473 adimensional
Eficiencia	92.34 %
Relación Frente Espalda Plano E D/A	14.338 dB
Relación Frente Espalda Plano H D/A	2.114 dB
Ancho de Haz de Media potencia Plano E FNBW	116.3°
Ancho de Haz de Media potencia Plano H FNBW	38.5°

CAPITULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se presenta los resultados de las mediciones explicadas en el Capítulo III, además, se realiza un análisis de errores con los resultados de la simulación de las antenas obtenidos en el Capítulo IV. Primero se presenta los resultados obtenidos al valorar el estado actual de la cámara anecoica, es decir las mediciones realizadas con el equipo Narda NBM 550 y las mediciones del patrón de radiación de la antena de prueba. Posteriormente se presenta los resultados de las mediciones de los parámetros de antenas y su respectivo análisis de error con los valores de los datos simulados.

5.1. Estimación del Estado Actual de la Cámara Anecoica.

5.1.1. Valoración mediante el uso del equipo Narda NBM 550.

5.1.1.1. Fuera de la Cámara Anecoica.

Con el medidor ubicado en las posiciones mostradas en la

Figura II. Posición del Medidor Fuera de la Cámara Anecoica.

, y realizando una medición promedio del campo eléctrico captado en el medio ambiente en un tiempo de 3 minutos, se obtuvo los resultados mostrados en la **Tabla 8.**

Tabla 8.

Nivel de referencia de campo eléctrico fuera de la cámara anecoica.

Posición	Campo – E [V/m]
1	0.1103
2	0.1405
3	0.1312
Promediado de todas las posiciones.	0.1280

Como se puede observar, en la parte exterior de la cámara anecoica existe un nivel de campo eléctrico promedio de 0.1280 [V/m].

Una vez determinado el nivel de referencia de campo eléctrico en el exterior de la cámara anecoica, se presenta los resultados de las mediciones con la intervención de varias antenas radiando a diferentes niveles de potencia, como ya se detalló en el Capítulo III. Se realizaron dos tipos de mediciones, la primera fue una medición instantánea de campo eléctrico y la segunda un promedio del campo eléctrico captado en el medio ambiente en un tiempo de 2 minutos, ambas con la antena radiando.

La primera antena utilizada como transmisora fue una de tipo micro línea Yagui-Uda de 5 elementos, que trabaja a una frecuencia de 2.4 Ghz, con niveles potencia de 0, 10 15 y 20 dBm. En la **Tabla 9**, se presenta los resultados de las mediciones con la antena Yagui-Uda en polarización horizontal y el medidor Narda NBM 550, en las tres posiciones mostradas anteriormente en la **Figura 12**.

Tabla 9.

Campo E fuera de la cámara, Antena Yagui-Uda en Polarización Horizontal.

Posición	Potencia Tx [dBm]	Medición Instantánea Campo Eléctrico [V/m]	Medición Promedio de Campo Eléctrico [V/m]		
			Máximo	Mínimo	Promedio
1	0	0.1313	0.1350	0.11040	0.1248
	10	0.1161	0.1417	0.1320	0.1422
	15	0.1242	0.1305	0.1140	0.1249
	20	0.1224	0.1283	0.0892	0.1231
2	0	0.2025	0.1452	0.1240	0.1378
	10	0.1193	0.1371	0.1285	0.1314
	15	0.1240	0.1565	0.1193	0.1452
	20	0.1169	0.1040	0.0675	0.0860
3	0	0.1169	0.2053	0.1983	0.2016
	10	0.1371	0.2094	0.1997	0.2039
	15	0.1704	0.2526	0.2277	0.2379
	20	0.1285	0.2201	0.2161	0.2183

En la **Tabla 10**, se presenta los resultados de las mediciones con la antena Yagui-Uda en polarización vertical, el medidor Narda NBM 550 ubicado en las tres posiciones mostradas anteriormente en la **Figura 12**.

Tabla 10.

Campo E fuera de la cámara, Antena Yagui-Uda en Polarización Vertical.

Posición	Potencia Tx [dBm]	Medición Instantánea Campo Eléctrico [V/m]	Medición Promedio de Campo Eléctrico [V/m]		
			Máximo	Mínimo	Promedio
1	0	0.1151	0.1121	0.9044	0.1020
	10	0.1205	0.1272	0.1032	0.1094
	15	0.1015	0.1212	0.1005	0.1168
	20	0.1315	0.1354	0.1042	0.1228
2	0	0.1285	0.1654	0.1193	0.1412
	10	0.1350	0.0984	0.0238	0.0779
	15	0.1412	0.1510	0.1067	0.1255
	20	0.1547	0.1412	0.1120	0.1285
3	0	0.1350	0.3995	0.2135	0.3149
	10	0.0754	0.1412	0.1193	0.13.7
	15	0.1240	0.1528	0.1263	0.1385
	20	0.1329	0.1849	0.1528	0.1693

La segunda antena utilizada como transmisora fue una de tipo micro línea Logarítmica Periódica, que trabaja a una frecuencia de 1 Ghz, con niveles de potencia de 0, 10 15 y 20 dBm. En la **Tabla 11**, se presenta los resultados de las mediciones con la antena Logarítmica en polarización horizontal y el medidor Narda NBM 550 ubicado en las tres posiciones mostradas anteriormente en la **Figura 12**.

Tabla 11.

Campo E fuera de la cámara, Antena Logarítmica en Polarización Horizontal.

Posición	Potencia Tx [dBm]	Medición Instantánea Campo Eléctrico [V/m]	Medición Promedio de Campo Eléctrico [V/m]		
			Máximo	Mínimo	Promedio
1	0	0.2302	0.2526	0.2423	0.2489
	10	0.2081	0.2615	0.2571	0.2589
	15	0.2894	0.2874	0.2732	0.2821
	20	0.2784	0.2701	0.2469	0.2611
2	0	0.1688	0.1285	0.0893	0.1111
	10	0.0791	0.1350	0.1145	0.1248
	15	0.1392	0.1240	0.1040	0.1128
	20	0.1653	0.1833	0.1565	0.1738
3	0	0.1997	0.1471	0.1392	0.1432
	10	0.1754	0.2108	0.1654	0.1844
	15	0.1954	0.1849	0.1705	0.1770
	20	0.1895	0.1968	0.1705	0.1812

En la **Tabla 12**, se presenta los resultados de las mediciones con la antena Logarítmica en polarización vertical y el medidor Narda NBM 550 ubicado en las tres posiciones mostradas anteriormente en la **Figura 12**.

Tabla 12.

Campo E fuera de la cámara, Antena Logarítmica en Polarización Vertical.

Posición	Potencia Tx [dBm]	Medición Instantánea Campo Eléctrico [V/m]	Medición Promedio de Campo Eléctrico [V/m]		
			Máximo	Mínimo	Promedio
1	0	0.2025	0.2289	0.2067	0.2153
	10	0.1983	0.2457	0.2264	0.2330
	15	0.2252	0.2492	0.2252	0.2339
	20	0.2339	0.2175	0.2121	0.2157
2	0	0.0675	0.1120	0.0924	0.1022
	10	0.1491	0.1217	0.0675	0.0954
	15	0.1067	0.1350	0.1040	0.1248
	20	0.0631	0.0954	0.0826	0.0882
3	0	0.0954	0.1547	0.1452	0.1497
	10	0.1864	0.1471	0.1350	0.1425
	15	0.1636	0.2039	0.1688	0.1849
	20	0.1528	0.2135	0.1688	0.1983

La tercera antena utilizada como transmisora fue una de tipo Espiral, que trabaja a una frecuencia de 1.5 Ghz, con niveles de potencia de 0, 10 15 y 20 dBm. En la **Tabla 13**, se presenta los resultados de las mediciones con la antena Espiral, en polarización circular y el medidor Narda NBM 550 ubicado en las tres posiciones mostradas anteriormente en la **Figura 12**.

Tabla 13.

Campo E fuera de la cámara, Antena Espiral en Polarización Circular.

Posición	Potencia Tx [dBm]	Medición Instantánea Campo Eléctrico [V/m]	Medición Promedio de Campo Eléctrico [V/m]		
			Máximo	Mínimo	Promedio
1	0	0.1968	0.2201	0.1997	0.2081
	10	0.2469	0.2351	0.2188	0.2243
	15	0.2239	0.2469	0.2287	0.2438
	20	0.2213	0.2302	0.2161	0.2256
2	0	0.0924	0.1169	0.0533	0.0903
	10	0.0893	0.0675	0.0477	0.0616
	15	0.0954	0.0533	0	0.0308
	20	0.0413	0.0893	0.0533	0.0702
3	0	0.0675	0.1240	0.086	0.1022
	10	0.0924	0.0860	0.0631	0.0742
	15	0.11013	0.1371	0.0893	0.1094
	20	0.07916	0.1583	0.1193	0.1439

En **Tabla 14**, se presenta una comparación de los valores de campo eléctrico promedio de las tres antenas en polarización vertical, horizontal y circular para el caso de la antena Espiral, direccionadas hacia el frente y el medidor ubicado en la posición 1 de la **Figura 12**.

Tabla 14.

Medidor Posición 1, comparación del campo E fuera de la cámara

Antena	Potencia Tx [dBm]	Medición Promedio Campo Eléctrico [V/m]	
		Polarización Horizontal	Polarización Vertical
Yagui-Uda a 2,4 GHz	0	0.1248	0.1020
	10	0.1422	0.1094
	15	0.1249	0.1168
	20	0.1231	0.1228
Logarítmica a 1 GHz	0	0.2489	0.2153
	10	0.2589	0.2330
	15	0.2821	0.2339
	20	0.2611	0.2157
Polarización Circular			
Espiral a 1,5 GHz	0	0.2081	
	10	0.2243	
	15	0.2438	
	20	0.2256	

Con respecto a la pared frontal de la cámara anecoica se puede decir que, según los resultados obtenidos en primera instancia del nivel de referencia de campo eléctrico en el medio ambiente, con un valor de 0.1280 [V/m], y segundo con las antenas ubicadas en la parte interior de la cámara, transmitiendo en tres frecuencias y diferentes niveles de potencia, se observa que para la antena Yagui-Uda, transmitiendo a una frecuencia de 2.4 GHz, tanto en polarización vertical y horizontal no existe una variación con respecto al nivel de referencia, por lo tanto, se considera que no existe fugas de campo eléctrico hacia el exterior. Para la antena Logarítmica que trabaja a una frecuencia de 1 GHz, tanto en polarización horizontal y vertical se observa que, mantiene un valor promedio alrededor de 0.2236 [V/m], esta pequeña variación con respecto al nivel de referencia, se puede relacionar a factores externos a la medición como puede ser el caso de interferencia de ondas en la misma frecuencia, por lo tanto, no se considera como fuga de campo eléctrico de la cámara

anecoica. Por último, para el caso de la antena Espiral, se observa que presenta un valor promedio alrededor de 0.2254 [V/m] y de la misma manera como el caso anterior, no se considera como fugas de campo eléctrico del interior de la cámara anecoica.

En la **Tabla 15**, se presenta una comparación de los valores de campo eléctrico promedio de las tres antenas en polarización vertical, horizontal y circular para el caso de la antena Espiral, direccionadas hacia el lateral y el medidor ubicado en la posición 2 de la **Figura 12**.

Tabla 15.

Medidor Posición 2, comparación del campo E fuera de la cámara

Antena.	Potencia Tx [dBm]	Medición Promedio Campo Eléctrico [V/m]	
		Polarización Horizontal	Polarización Vertical
Yagui-Uda a 2,4 GHz	0	0.1378	0.1412
	10	0.1314	0.0779
	15	0.1452	0.1255
	20	0.0860	0.1285
Logarítmica a 1 GHz	0	0.1111	0.1022
	10	0.1248	0.0954
	15	0.1128	0.1248
	20	0.1738	0.0882
Polarización Circular			
Espiral a 1,5 GHz	0	0.0903	
	10	0.0616	
	15	0.0308	
	20	0.0702	

Con respecto a la pared lateral de la cámara anecoica se puede decir que, según los resultados obtenidos, se observa que para la antena Yagui-Uda, transmitiendo a una frecuencia de 2.4 GHz, tanto en polarización horizontal y vertical existe una variación mínima con respecto al nivel de referencia, con un valor de 0.0172[V/m], el cual no se considera como un valor no relevante, por lo tanto, no representa una fuga campo eléctrico hacia el exterior. Para la antena Logarítmica que trabaja a una frecuencia de 1 GHz, tanto en polarización horizontal y vertical se observa que, no existe un valor que supere al nivel de referencia de campo eléctrico, por lo tanto, no existe fugas de campo eléctrico de la cámara anecoica. Por último, para el caso de la antena Espiral, de la misma

manera se observa que todos los valores a diferentes niveles de potencia no supera el 0.09 [V/m], por ende, no existe fugas de campo eléctrico desde el interior de la cámara anecoica.

En la **Tabla 16**, se presenta una comparación de los valores de campo eléctrico promedio de las tres antenas en polarización vertical, horizontal y circular para el caso de la antena Espiral, direccionadas hacia atrás y el medidor ubicado en la posición 3 de la **Figura 12**.

Tabla 16.

Medidor Posición 3, comparación del campo E fuera de la cámara

Antena	Potencia Tx [dBm]	Medición Promedio Campo Eléctrico [V/m]	
		Polarización Horizontal	Polarización Vertical
Yagui-Uda a 2,4 GHz	0	0.2016	0.3149
	10	0.2039	0.13.7
	15	0.2379	0.1385
	20	0.2183	0.1693
Logarítmica a 1 GHz	0	0.1432	0.1497
	10	0.1844	0.1425
	15	0.1770	0.1849
	20	0.1812	0.1983
		Polarización Circular	
Espiral a 1,5 GHz	0	0.1022	
	10	0.0742	
	15	0.1094	
	20	0.1439	

Con respecto a la pared posterior de la cámara anecoica se puede decir que, según los resultados obtenidos, se observa que para la antena Yagui-Uda, transmitiendo a una frecuencia de 2.4 GHz, tanto en polarización vertical y horizontal existe una variación con respecto al nivel de referencia, en los diferentes niveles potencia de transición, resultando un valor máximo para la polarización vertical en 0 dbm, con un valor de 0.1869[V/m], no obstante, se puede observar que para el mayor nivel de potencia de transmisión existe menor diferencia de campo eléctrico, por lo tanto, este incremento se puede relacionar a factores externos a la medición como puede ser el caso de interferencia de ondas en misma frecuencia de medición, entonces, no representa fugas de campo eléctrico hacia el exterior. Para la antena Logarítmica que trabaja a una frecuencia de 1 GHz, tanto

en polarización vertical y horizontal se observa que, existe una mínima variación con respecto al nivel de referencia, con un valor de 0.0564[V/m], el cual no se considera como un valor relevante, por lo tanto, no representa fugas de campo eléctrico hacia el exterior. Por último, para el caso de la antena Espiral, se observa que existe una mínima variación con respecto al nivel de referencia, con un valor de 0.0158 [V/m], el cual no se considera como un valor relevante, por lo tanto, no representa fugas campo eléctrico hacia el exterior.

5.1.1.2. Dentro de la Cámara Anecoica.

De la misma manera como en la parte exterior, primero se presenta los resultados de las mediciones del nivel de referencia de campo eléctrico dentro de la cámara anecoica. El tipo de medición fue un promedio de campo eléctrico captado en el medio ambiente en un tiempo de 3 minutos y el medidor Narda NBM 550 ubicado en las posiciones detalladas anteriormente en la **Figura 13**. Los resultados se muestra en la **Tabla 17**.

Tabla 17.

Nivel de referencia del campo eléctrico dentro de la cámara anecoica.

Posición	Campo – E [V/m]
1	0.0732
2	0.0517
3	0.0425
Promediado de todas las posiciones.	0.0425

Se puede determinar entonces que el nivel de referencia de campo eléctrico en el medio ambiente dentro de la cámara anecoica es de 0.0425 [V/m], siendo un valor mucho menor a comparación del nivel determinado en la parte exterior, eso es debido a que dentro de la cámara anecoica existe menos interferencia de las ondas de luz y de portadoras a diferentes frecuencias.

Ahora se presenta los resultados de las mediciones con la intervención de las mismas antenas utilizadas en la parte exterior, sin variar los parámetros de las antenas, la única variación que se realizó fue el tipo de medición en el equipo Narda NBM 550, debido a que dentro de la cámara anecoica no se puede manipular libremente el equipo, razón por la cual se tomó el valor del campo eléctrico promedio en un tiempo de 3 minutos.

En la **Tabla 18**, se presenta los resultados de las mediciones con la antena Yagui-Uda direccionada hacia el frente en polarización horizontal y vertical con el medidor Narda NBM 550 ubicado en las tres posiciones mostradas anteriormente en la **Figura 14 (a)**.

Tabla 18.

Campo E dentro de la cámara, Antena Yagui-Uda direccionada al frente.

Posición	Potencia Tx [dBm]	Medición Promedio del Campo Eléctrico [V/m] Polarización Horizontal	Medición Promedio del Campo Eléctrico [V/m] Polarización Vertical
1	0	0.0841	0.1087
	10	0.2221	0.1990
	15	0.4252	0.3285
	20	0.6638	0.5245
2	0	0.0900	0.1217
	10	0.0821	0.1151
	15	0.0903	0.1508
	20	0.1797	0.2127
3	0	0.0779	0.0849
	10	0.1059	0.1618
	15	0.1408	0.270
	20	0.2196	0.4477

Se puede observar que tanto en polarización horizontal como vertical, en las tres posiciones que se ubica el medidor, todos los valores de campo eléctrico sobrepasan el nivel de referencia, siendo el más notorio cuando el medidor se ubica en la esquina frontal del interior de la cámara, llegando hasta un valor de 0.6638 [V/m] en polarización horizontal y 0.5245 [V/m] en polarización vertical, a una potencia de transmisión de 20 [dBm], esto se debe a que el medidor se encuentra en la misma dirección en la cual está apuntando la antena, por lo que recibe directamente el campo eléctrico

que está radiando. Para las posiciones 2 y 3 del medidor, se observa un leve incremento de campo eléctrico, este incremento se debe a que llega a captar la radiación de los lóbulos laterales o posteriores de la antena o a su vez rayos reflejados existentes dentro de la cámara anecoica.

En la **Tabla 19**, se presenta los resultados de las mediciones con la antena Yagui-Uda direccionada hacia el lado derecho en polarización horizontal y vertical con el medidor Narda NBM 550 ubicado en las tres posiciones mostradas anteriormente en la **Figura 14(b)**.

Tabla 19.

Campo E dentro de la cámara, Antena Yagui-Uda direccionada al lado derecho.

Posición	Potencia Tx [dBm]	Medición Instantánea	Medición Instantánea
		Campo Eléctrico [V/m] Polarización Horizontal	Campo Eléctrico [V/m] Polarización Vertical
1	0	0.1203	0.1054
	10	0.3358	0.1663
	15	0.2227	0.2309
	20	0.3172	0.3416
2	0	0.1453	0.1129
	10	0.4784	0.3714
	15	0.8474	0.6644
	20	1.369	0.9832
3	0	0.0854	0.0683
	10	0.1072	0.1225
	15	0.2879	0.1926
	20	0.4469	0.3183

Se puede observar que tanto en polarización vertical como horizontal en las tres posiciones que se ubica el medidor, todos los valores de campo eléctrico sobrepasan el nivel de referencia, siendo el más notorio cuando el medidor se ubica en la parte lateral derecha de la cámara, llegando hasta un valor de 1.369 [V/m] en polarización horizontal y 0.9832 [V/m] en polarización vertical, a una potencia de transmisión de 20 [dBm], esto se debe a que el medidor se encuentra en la misma dirección en la cual está apuntando la antena, por lo que recibe directamente el campo eléctrico que está radiando. Se tiene un mayor incremento que la posición anterior debido a que el medidor se encuentra a menor distancia de separación de la antena. Para las posiciones 1 y 3 del medidor,

se observa un leve incremento de campo eléctrico, pero esto se debe a que llega a captar la radiación de los lóbulos laterales o posteriores de la antena o a su vez rayos reflejados existentes dentro de la cámara.

En la **Tabla 20**, se presenta los resultados de las mediciones con la antena Yagui-Uda direccionada hacia la parte posterior en polarización horizontal y vertical con el medidor Narda NBM 550 ubicado en las tres posiciones mostradas anteriormente en la **Figura 14 (c)**.

Tabla 20.

Campo E dentro de la cámara, Antena Yagui-Uda direccionada hacia atrás.

Posición	Potencia Tx [dBm]	Medición Instantánea	Medición Instantánea
		Campo Eléctrico [V/m] Polarización Horizontal	Campo Eléctrico [V/m] Polarización Vertical
1	0	0.0899	0.1082
	10	0.0979	0.1566
	15	0.1440	0.3356
	20	0.2771	0.3130
2	0	0.1280	0.0766
	10	0.1395	0.1312
	15	0.1571	0.2184
	20	0.2048	0.3355
3	0	0.0552	0.0594
	10	0.1117	0.2146
	15	0.2099	0.3428
	20	0.3355	0.6381

Se puede observar que tanto en polarización vertical como horizontal en las tres posiciones que se ubica el medidor, todos los valores de campo eléctrico sobrepasan el nivel de referencia, siendo el más notorio cuando el medidor se ubica en la esquina posterior de la cámara, llegando hasta un valor de 0.3355 [V/m] en polarización horizontal y 0.6381 [V/m] en polarización vertical, a una potencia de transmisión de 20 [dBm], esto se debe a que el medidor se encuentra en la misma dirección en la cual está apuntando la antena, por lo que recibe directamente el campo eléctrico que está radiando. Se tiene un menor incremento con respecto a las anteriores dos posiciones debido a que el medidor se encuentra a mayor distancia de separación de la antena. Para las posiciones 1

y 2 del medidor, se observa un leve incremento de campo eléctrico, pero esto se debe a que llega a captar la radiación de los lóbulos laterales o posteriores de la antena o a su vez rayos reflejados existentes dentro de la cámara.

A continuación, en la **Tabla 21**, se presenta los resultados obtenidos al utilizar la antena Logarítmica Periódica, la cual se encuentra direccionada hacia el frente en polarización horizontal y vertical con el medidor Narda NBM 550 ubicado en las tres posiciones mostradas anteriormente en la **Figura 14 (a)**.

Tabla 21.

Campo E dentro de la cámara, Antena Logarítmica direccionada al frente.

Posición	Potencia	Medición Instantánea	Medición Instantánea
	Tx [dBm]	Campo Eléctrico [V/m] Polarización Horizontal	Campo Eléctrico [V/m] Polarización Vertical
1	0	0.2208	0.2255
	10	0.6748	0.6641
	15	1.2210	1.2200
	20	2.0200	2.0790
2	0	0.1493	0.1209
	10	0.3189	0.3907
	15	0.5680	0.7449
	20	0.9805	1.2300
3	0	0.1069	0.1534
	10	0.3317	0.4603
	15	0.6148	0.8662
	20	0.9917	1.4270

Se puede observar que tanto en polarización vertical como horizontal en las tres posiciones que se ubica el medidor, todos los valores de campo eléctrico sobrepasan el nivel de referencia, siendo el más notorio cuando el medidor se ubica en la esquina frontal de la cámara, llegando hasta un valor de 2.0200 [V/m] en polarización horizontal y 2.0790 [V/m] en polarización vertical, a una potencia de transmisión de 20 [dBm], esto se debe a que el medidor se encuentra en la misma dirección en la cual está apuntando la antena, por lo que recibe directamente el campo eléctrico que está radiando. Para las posiciones 2 y 3 del medidor, se observa un leve incremento de campo

eléctrico, pero esto se debe a que llega a captar la radiación de los lóbulos laterales o posteriores de la antena o a su vez rayos reflejados existentes dentro de la cámara.

En la **Tabla 22**, se presenta los resultados de las mediciones con la antena Logarítmica Periódica direccionada hacia el lado derecho en polarización horizontal y vertical con el medidor Narda NBM 550 ubicado en las tres posiciones mostradas anteriormente en la **Figura 14 (b)**.

Tabla 22.

Campo E dentro de la cámara, Antena Logarítmica direccionada a la derecha.

Posición	Potencia	Medición Instantánea	Medición Instantánea
	Tx [dBm]	Campo Eléctrico [V/m] Polarización Horizontal	Campo Eléctrico [V/m] Polarización Vertical
1	0	0.1738	0.1885
	10	0.4681	0.5948
	15	0.8401	1.0700
	20	1.4480	1.7690
2	0	0.2302	0.1924
	10	0.6903	0.5529
	15	1.2540	0.9528
	20	2.1230	1.6900
3	0	0.1189	0.1083
	10	0.3440	0.3049
	15	0.6359	0.5454
	20	0.9057	0.8751

Se puede observar que tanto en polarización vertical como horizontal en las tres posiciones que se ubica el medidor, todos los valores de campo eléctrico sobrepasan el nivel de referencia, siendo el más notorio cuando el medidor se ubica en la parte lateral de la cámara, llegando hasta un valor de 2.1230 [V/m] en polarización horizontal y 1.6900 [V/m] en polarización vertical, a una potencia de transmisión de 20 [dBm], esto se debe a que el medidor se encuentra en la misma dirección en la cual está apuntando la antena, por lo que recibe directamente el campo eléctrico que está radiando. Se tiene un mayor incremento que la posición anterior debido a que el medidor se encuentra a menor distancia de separación de la antena. Para las posiciones 1 y 3 del medidor, se observa un leve incremento de campo eléctrico, pero esto se debe a que llega a captar la radiación de los lóbulos laterales o posteriores de la antena o a su vez rayos reflejados existentes dentro de la cámara.

En la **Tabla 23**, se presenta los resultados de las mediciones con la antena Logarítmica Periódica direccionada hacia la parte posterior en polarización horizontal y vertical con el medidor Narda NBM 550 ubicado en las tres posiciones mostradas anteriormente en la **Figura 14 (c)**.

Tabla 23.

Campo E dentro de la cámara, Antena Logarítmica direccionada hacia atrás.

Posición	Potencia	Medición Instantánea	Medición Instantánea
	Tx [dBm]	Campo Eléctrico [V/m] Polarización Horizontal	Campo Eléctrico [V/m] Polarización Vertical
1	0	0.9377	0.0696
	10	0.5913	0.1629
	15	0.3165	0.3109
	20	0.1301	0.5286
2	0	0.1635	0.1753
	10	0.4444	0.5153
	15	0.8044	0.9097
	20	1.3390	1.6350
3	0	0.2165	0.2071
	10	0.6864	0.6458
	15	1.2780	1.0420
	20	2.1350	1.6220

Se puede observar que tanto en polarización vertical como horizontal en las tres posiciones que se ubica el medidor, todos los valores de campo eléctrico sobrepasan el nivel de referencia, siendo el más notorio cuando el medidor se ubica en la parte posterior de la cámara, llegando hasta un valor de 2.1350 [V/m] en polarización horizontal y 1.6220 [V/m] en polarización vertical, a una potencia de transmisión de 20 [dBm], esto se debe a que el medidor se encuentra en la misma dirección en la cual está apuntando la antena, por lo que recibe directamente el campo eléctrico que está radiando. Se tiene un mayor incremento que la posición anterior debido a que el medidor se encuentra a menor distancia de separación de la antena. Para las posiciones 1 y 2 del medidor, se observa un leve incremento de campo eléctrico, pero esto se debe a que llega a captar la radiación de los lóbulos laterales o posteriores de la antena o a su vez rayos reflejados existentes dentro de la cámara.

Por último, en la **Tabla 24**, se presenta los resultados con la antena Espiral, en polarización circular y el medidor Narda NBM 550 ubicado en las tres posiciones mostradas anteriormente en la **Figura 14 (a)**.

Tabla 24.

Campo E dentro de la cámara, Antena Espiral direccionada hacia el frente.

Posición	Potencia Tx [dBm]	Medición Instantánea Campo Eléctrico [V/m]
1	0	0.0580
	10	0.1103
	15	0.2540
	20	0.4360
2	0	0.0141
	10	0.0313
	15	0.1869
	20	0.3037
3	0	0.0811
	10	0.1031
	15	0.1867
	20	0.2880

Se puede observar que, para las tres posiciones los valores de campo eléctrico sobrepasan el nivel de referencia, siendo el más notorio cuando el medidor se ubica en la esquina frontal de la cámara, llegando hasta un valor de 0.4360 [V/m], a una potencia de transmisión de 20 [dBm], esto se debe a que el medidor se encuentra en la misma dirección en la cual está apuntando la antena, por lo que recibe directamente el campo eléctrico que está radiando. Para las posiciones 2 y 3 del medidor, se observa un leve incremento de campo eléctrico, pero esto se debe a que llega a captar la radiación de los lóbulos laterales o posteriores de la antena o a su vez rayos reflejados existentes dentro de la cámara.

En la **Tabla 25**, se presenta los resultados de las mediciones con la antena Espiral direccionada hacia el lado derecho en polarización circular y el medidor Narda NBM 550 ubicado en las tres posiciones mostradas anteriormente en la **Figura 14 (b)**.

Tabla 25.

Campo E dentro de la cámara, Antena Espiral direccionada hacia la derecha.

Posición	Potencia Tx [dBm]	Medición Instantánea Campo Eléctrico [V/m]
1	0	0.0716
	10	0.1412
	15	0.2829
	20	0.4220
2	0	0.1015
	10	0.2112
	15	0.3545
	20	0.5776
3	0	0.1000
	10	0.2216
	15	0.3896
	20	0.5250

Se puede observar que, para las tres posiciones los valores de campo eléctrico sobrepasan el nivel de referencia, siendo el más notorio cuando el medidor se ubica en la parte lateral de la cámara, llegando hasta un valor de 0.5776 [V/m], a una potencia de transmisión de 20 [dBm], esto se debe a que el medidor se encuentra en la misma dirección en la cual está apuntando la antena, por lo que recibe directamente el campo eléctrico que está radiando. Para las posiciones 1 y 3 del medidor, se observa un leve incremento de campo eléctrico, pero esto se debe a que llega a captar la radiación de los lóbulos laterales o posteriores de la antena o a su vez rayos reflejados existentes dentro de la cámara.

En la **Tabla 26**, se presenta los resultados de las mediciones con la antena Espiral direccionada hacia el lado derecho en polarización circular y el medidor Narda NBM 550 ubicado en las tres posiciones mostradas anteriormente en la **Figura 14 (b)**.

Tabla 26.

Campo E dentro de la cámara, Antena Espiral direccionada hacia la derecha.

Posición	Potencia Tx [dBm]	Medición Instantánea Campo Eléctrico [V/m]
1	0	0.0747
	10	0.0945
	15	0.1647

Continua →

	20	0.2746
	0	0.0802
2	10	0.1814
	15	0.3216
	20	0.5041
	0	0.0645
3	10	0.2199
	15	0.4037
	20	0.6313

Se puede observar que, para las tres posiciones los valores de campo eléctrico sobrepasan el nivel de referencia, siendo el más notorio cuando el medidor se ubica en la parte posterior de la cámara, llegando hasta un valor de 0.5041 [V/m], a una potencia de transmisión de 20 [dBm], esto se debe a que el medidor se encuentra en la misma dirección en la cual está apuntando la antena, por lo que recibe directamente el campo eléctrico que está radiando. Para las posiciones 2 y 3 del medidor, se observa un leve incremento de campo eléctrico, pero esto se debe a que llega a captar la radiación de los lóbulos laterales o posteriores de la antena o a su vez rayos reflejados existentes dentro de la cámara.

En base a las mediciones obtenidas se puede deducir que no existe fugas de campo eléctrico de la cámara anecoica debido a que cuando el medidor se encontraba ubicado en el interior de la cámara y en la misma dirección en la cual las antenas estaban apuntando, el nivel de campo eléctrico a una potencia de transmisión de 20[dBm], llegó a tomar valores de hasta 2 [V/m], mientras que cuando el medidor se encontró en la parte exterior de la cámara anecoica y ubicado en la misma dirección en la que se encontraba direccionada la antena, se llegó a obtener un valor máximo de 0.2 [V/m], demostrando así que en las tres paredes en las cuales se realizó las mediciones no existe fugas de campo eléctrico.

5.1.2. Valoración mediante la medición de un Patrón de Radiación.

5.1.2.1. Fuera de la Cámara Anecoica.

Para las mediciones realizadas en la parte exterior de la cámara anecoica, se utilizó dos antenas de micro línea Yagui-Uda de cinco elementos, con conectores SMA, sin la intervención de los splitters para el acoplamiento con el WATS-2002. Las antenas presentan las mismas características para transmisión y recepción. La distancia de separación entre las dos antenas es de un metro, y con la ayuda del software del equipo WATS -2002 , conectado como se muestra en la **Figura 53**. Se obtuvo el diagrama de radiación de la antena.

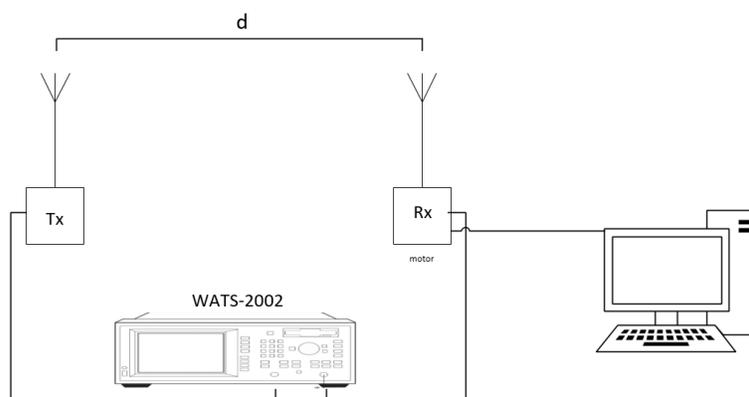


Figura 53. Medición del patrón de Radiación fuera de la cámara.

En primer lugar, se realizó tres mediciones con las antenas colocadas en polarización horizontal, se obtuvo los diagramas mostrados en la **Figura 54**.

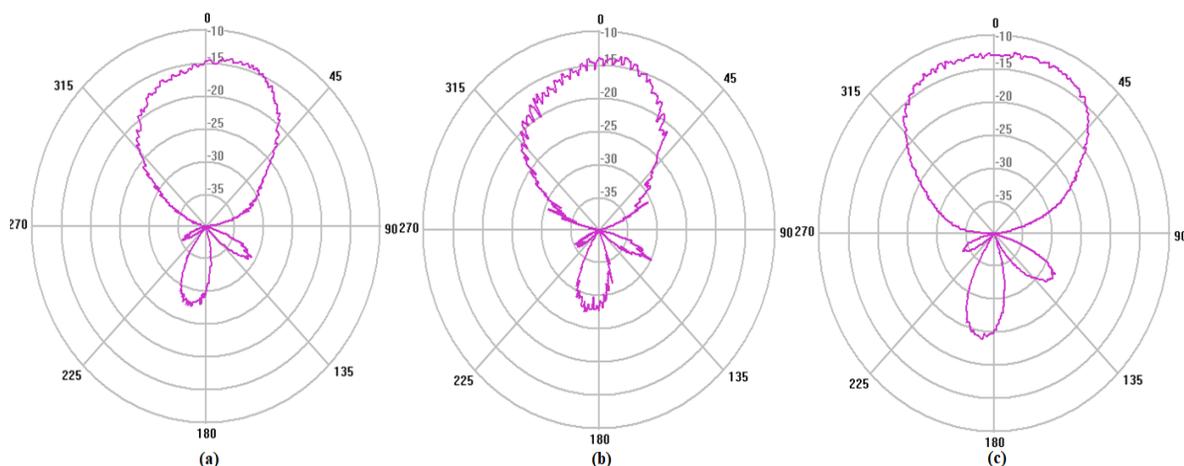


Figura 54. Primera medición Antena Yagui-Uda polarización horizontal. (a)
 Segunda medición Antena Yagui-Uda polarización horizontal. (b)
 Tercera medición Antena Yagui-Uda polarización horizontal. (c)

A continuación, en la **Figura 55**, se muestra las mediciones con las antenas en polarización vertical.

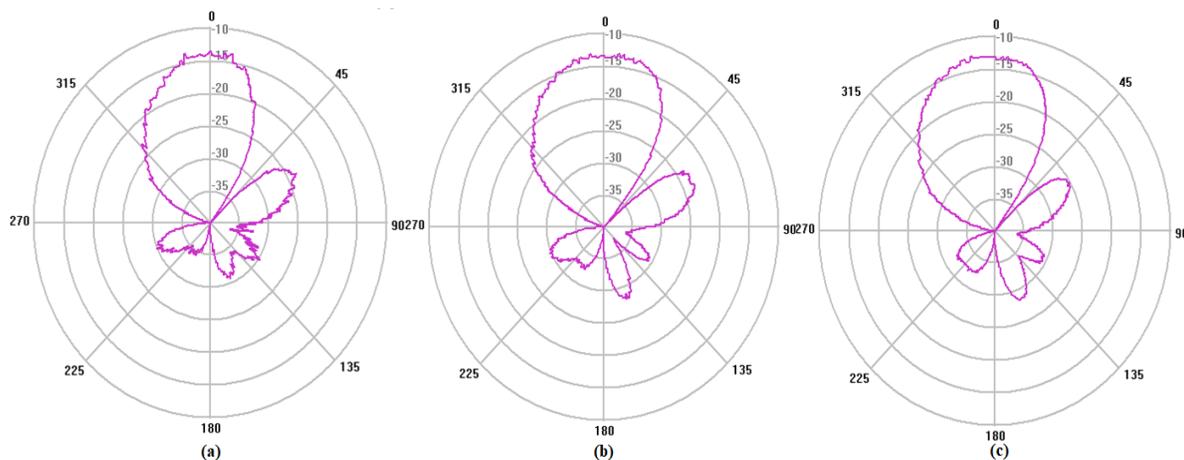


Figura 55. Primera medición Antena Yagui-Uda polarización vertical. (a)
 Segunda medición Antena Yagui-Uda polarización vertical. (b)
 Tercera medición Antena Yagui-Uda polarización vertical. (c)

En las tres mediciones realizadas, en polarización horizontal vertical, según la **Figura 56**, las gráficas del patrón de radiación de la antena Yagui-Uda a una distancia de 1 metro, presentan simetría con respecto al eje vertical, además, de una repetitividad para las mediciones.

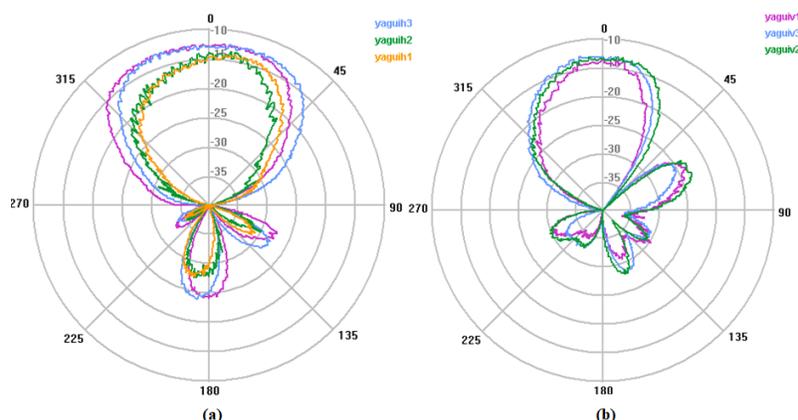


Figura 56. Comparación entre polarización (a) horizontal y (b) vertical, antena Yagui-Uda.

5.1.2.2. Dentro de la Cámara Anecoica.

Cabe recalcar que en la cámara anecoica del Laboratorio de Antenas y Electromagnetismo de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”, se ha retirado varias planchas de material absorbente del suelo, debido a que se necesitaba un espacio para poder manipular tanto la antena de transmisión y recepción. Se realizaron varias mediciones dentro de la cámara anecoica, variando diferentes parámetros o condiciones del ambiente, hasta que se obtuvo una similitud con los diagramas de radiación fuera de la cámara, además de una simetría y repetitividad.

El espacio en el cual existe la ausencia de material absorbente y la ubicación de las antenas se muestra a continuación en la **Figura 57**.

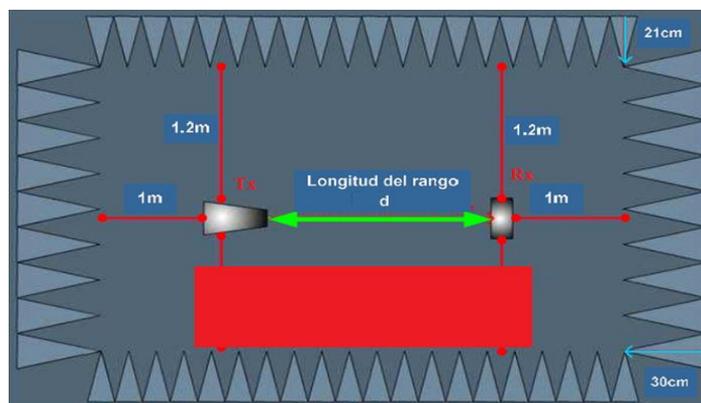


Figura 57. Ubicación de las antenas dentro de la cámara anecoica.

Como se puede observar, la antena de transmisión se ubica cerca de la pared posterior de la cámara, mientras que la antena de recepción, se ubica cerca de la pared frontal de la cámara, el cuadro en rojo representa el espacio donde fue retirado el material absorbente, para mayor facilidad de manipulación de las antenas.

La primera medición se realizó a una distancia de separación de 1 m, sin introducir planchas de material absorbente, extras en los lugares faltantes o en donde se presentaba problemas en el diagrama del patrón de radiación y se obtuvo los resultados mostrados en la **Figura 58**.

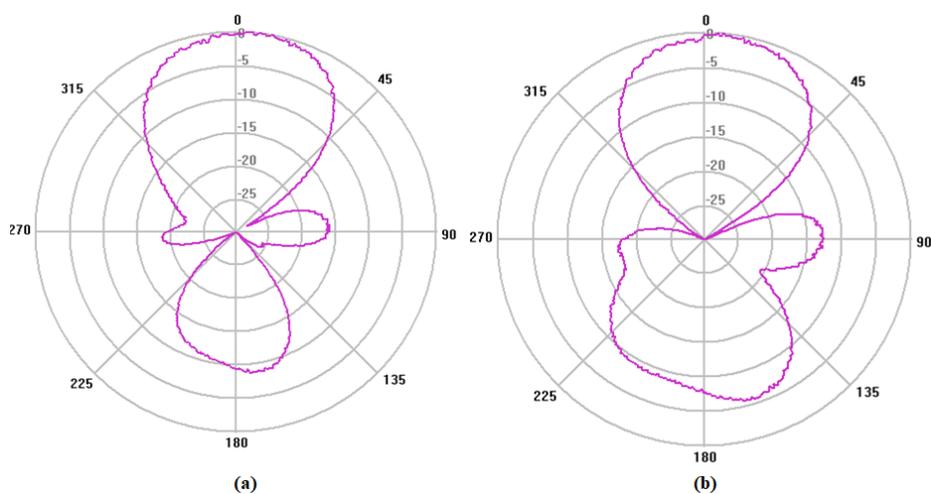


Figura 58. Primera medición en la cámara Antena Yagui-Uda polarización horizontal (a)
Segunda medición en la cámara Antena Yagui-Uda polarización horizontal (b)

Se puede observar que para la polarización horizontal no se obtiene una similitud entre las mediciones, ni tampoco con los diagramas obtenidos en la parte exterior de la cámara.

De la misma manera en la **Figura 59**, se presenta las gráficas de la primera medición con la antena en polarización vertical.

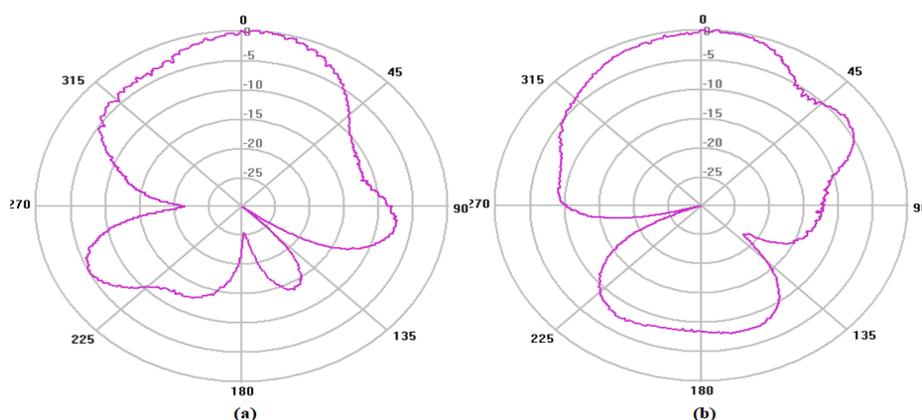


Figura 59. Primera medición en la cámara Antena Yagui-Uda polarización vertical (a)
Segunda medición en la cámara Antena Yagui-Uda polarización vertical (b).

Se puede observar que de la misma manera para la polarización vertical no se obtiene una similitud entre las mediciones, y tampoco con los diagramas obtenidos en la parte exterior de la cámara. Es evidente de igual manera que existe un inconveniente notorio en la parte posterior de la antena de recepción, debido a que existe mayor deformación del diagrama, por lo que se va a proceder a realizar mediciones cambiando el ambiente en ese sector, como por ejemplo añadiendo una plancha de material absorbente o variando la distancia de separación entre las antenas, hasta llegar a obtener resultados satisfactorios.

La tercera medición realizada, fue a una distancia de 1.20 metros, en polarización horizontal, en la cual se obtuvo un diagrama de radiación como se presenta en la **Figura 60**.

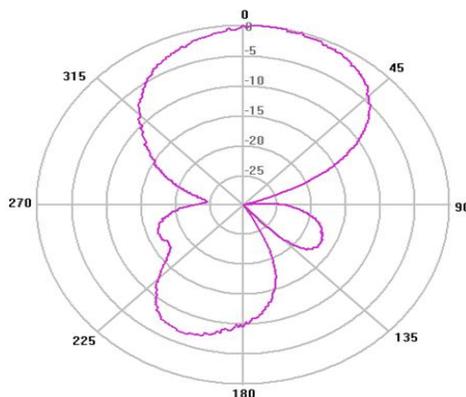


Figura 60. Tercera medición en la cámara Antena Yagui-Uda polarización horizontal.

Se observa que no existe una variación en el diagrama a comparación con la primera y segunda medición, sigue existiendo un lóbulo posterior muy pronunciado, razón por la cual para la siguiente medición se colocó dos planchas de material absorbente, asentadas en el piso en la parte posterior de la antena de recepción, aproximadamente en el tercer cuadrante, que es desde los 180° hasta los 270° , donde se presentaba el crecimiento del lóbulo posterior y se obtuvo el diagrama mostrado en la **Figura 61**.

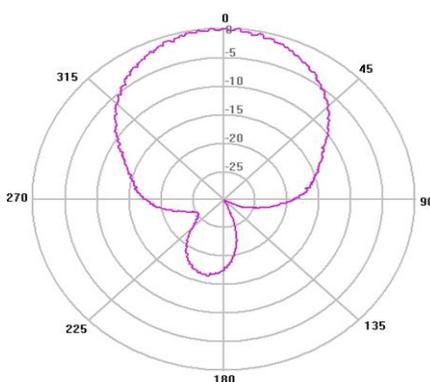


Figura 61. Cuarta medición en la cámara Antena Yagui-Uda polarización horizontal.

Se puede observar que se redujeron considerablemente los lóbulos posteriores del diagrama, de igual manera se nota que es menos directiva. Se procedió a cambiar de lugar las planchas de material absorbente, esta vez se las colocó en forma vertical en la esquina derecha de la pared frontal de la cámara y la distancia de separación de las antenas es ahora de 1.8 metros y se obtuvo el diagrama mostrado en la **Figura 62**.

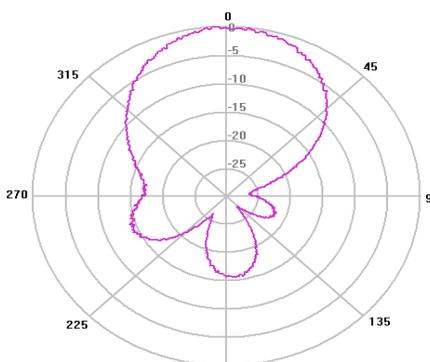


Figura 62. Quinta medición en la cámara Antena Yagui-Uda polarización horizontal.

Se puede observar que aparece un lóbulo lateral, cerca de llegar a los 270° y que existe una reducción del lóbulo posterior, por lo que se procedió a cambiar de nuevo las posiciones de las planchas de material absorbente, esta vez se colocó la plancha verticalmente apoyada en la pared, alrededor de los 270° y la otra plancha en el piso. La distancia de separación entre las antenas, esta vez fue de 0.98 metros y se obtuvo el diagrama mostrado en **Figura 63**.

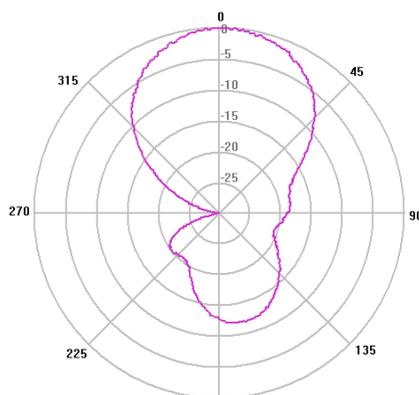


Figura 63. Sexta medición en la cámara Antena Yagui-Uda polarización horizontal.

Se observa que se redujo el lóbulo que apareció anteriormente alrededor de los 270° , sin embargo, aparece una deformación del diagrama aproximadamente en los 90° , por ende, se reacomodó las planchas de material absorbente, esta vez la una se colocó en la esquina frontal izquierda de la cámara y la otra en el piso alado derecho de la antena, separados una distancia de 1 metro, se obtuvo el diagrama de radiación mostrado en

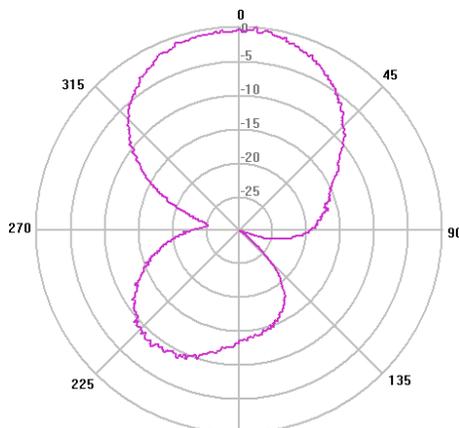


Figura 64. Séptima medición en la cámara Antena Yagui-Uda polarización horizontal.

Se puede observar que en las posiciones de 90 y 270 grados el diagrama se aproxima a 0 dBm, además que presenta un lóbulo posterior menor a comparación de las primeras mediciones y que tiene simetría con respecto al eje vertical por lo que se considera como un diagrama aceptable. Se realizó, dos mediciones con las mismas condiciones obteniendo el mismo resultado.

A continuación, se procedió a cambiar la estructura en la cual se encuentra montada la antena, se procedió a utilizar el kit completo del sistema WATS-2002, es decir que se utilizó los splitters en las antenas de transmisión y de recepción como se muestra en la **Figura 65**.

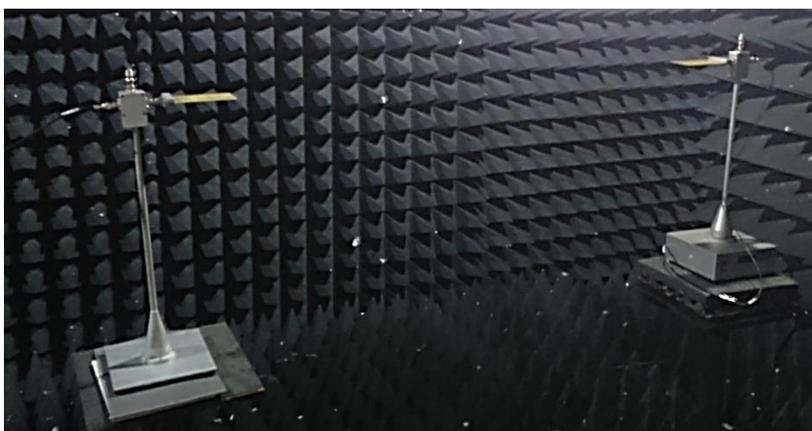


Figura 65. Octava medición en la cámara Antena Yagui-Uda, con splitters.

La distancia de separación entre las antenas fue de 1 metro, para polarización vertical y horizontal, se obtuvo los diagramas mostrados en la **Figura 66**.

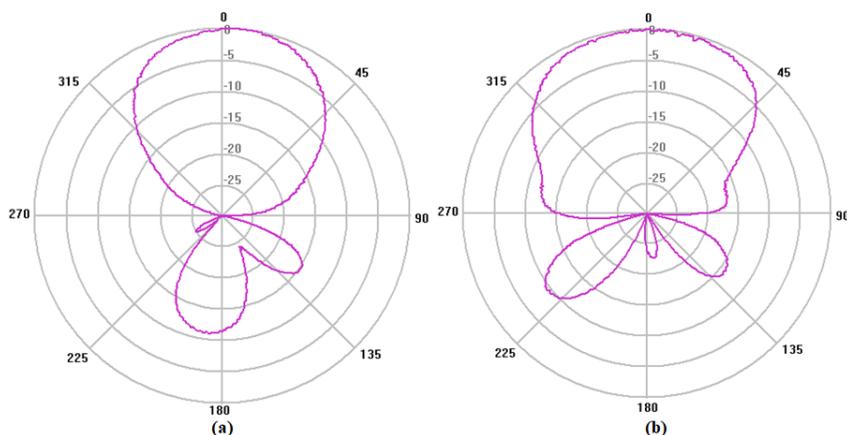


Figura 66. Medición en la cámara Yagui-Uda polarización horizontal (a) y vertical (b).

Se realizaron varias mediciones en las mismas condiciones, obteniendo los mismos resultados y como se puede observar tanto para la polarización vertical y horizontal, existe una simetría con respecto al eje vertical, además que una similitud con respecto a los diagramas obtenidos en la simulación, así como con los diagramas obtenidos en la parte exterior de la cámara, con la diferencia de que en el interior de la cámara, el diagrama presenta un trazo más fino al no existir perturbaciones externas. Razón por la cual se puede considerar que según las condiciones que se cambiaron y las mediciones realizadas, la cámara se encuentra funcional para realizar mediciones de los parámetros de antenas.

Es importante mencionar que la distancia de separación entre las antenas juega un papel fundamental al momento de realizar la medición del patrón de radiación, ya que se verificó que la distancia óptima para realizar las mediciones es de 1 metro de separación, debido a que si se excede esta distancia aproximadamente a partir de los 1.3 metros, el diagrama empieza a presentar distorsiones, debido a que mide la radiación de zonas apartadas. De igual manera al tener una distancia menor a un metro el diagrama se distorsiona debido a que la antena capta la radiación de los campos reactivos de la misma.

A su vez, se debe tomar muy en cuenta el alineamiento entre las antenas de transmisión y recepción, debido a que se verificó que cuando las antenas no se encuentran bien alineadas, se presenta distorsiones en las gráficas del patrón radiación, esto se debe a que dentro de la cámara anecoica, a parte del rayo directo que capta la antena de recepción existen varios rayos de reflexión provenientes del piso techo o paredes, los cuales son captados en diferentes direcciones, por lo que a continuación se realiza un análisis de la teoría de rayos dentro de la cámara anecoica.

5.1.2.3. Trazado de Rayos de la Cámara Anecoica.

El método del trazado de rayos se puede detallar mediante dos metodologías, la primera es la metodología de las imágenes y la segunda es el trazado de rayos. La metodología del trazado de rayos es utilizada para determinar el nivel más bajo de señal reflejada recibida en la antena, determinando el peor de los casos de señal recibida y a su vez calcular el ángulo de incidencia.

Para iniciar con el análisis del trazado de rayos se debe alinear la antena de transmisión y recepción en un mismo eje. Al momento de que la antena de transmisión se encuentra irradiando energía, la antena de recepción recibe múltiples rayos provenientes de las reflexiones con las paredes de la cámara anecoica. como se muestra en la **Figura 67**.

Los rayos representados en línea continua son los considerados como rayos primordiales para el análisis. El rayo principal es el rayo directo entre las antenas, los otros son llamados rayos de reflexión especulares o reflexión simple, provenientes de las paredes laterales, piso y techo. Los rayos que presentan más de tres rebotes no son considerados para el análisis, debido a que el nivel de señal después de los tres saltos es despreciable.

Los rayos reflejados se pueden considerar como si provienen de una imagen de la antena de transmisión, en la **Figura 67**, las imágenes especulares son identificados por un número y se encuentran representadas con líneas de puntos, a su vez las imágenes de una sola reflexión se puede considerar como un reflejo de la antena de transmisión en la pared donde el rayo se proyecta. Las Imágenes con doble salto, son las que están asociadas a una doble reflexión, y están formadas por la imagen de la antena patrón reflejada en una de las paredes laterales y luego en la pared de fondo. (Gaston & Julian, 2016).

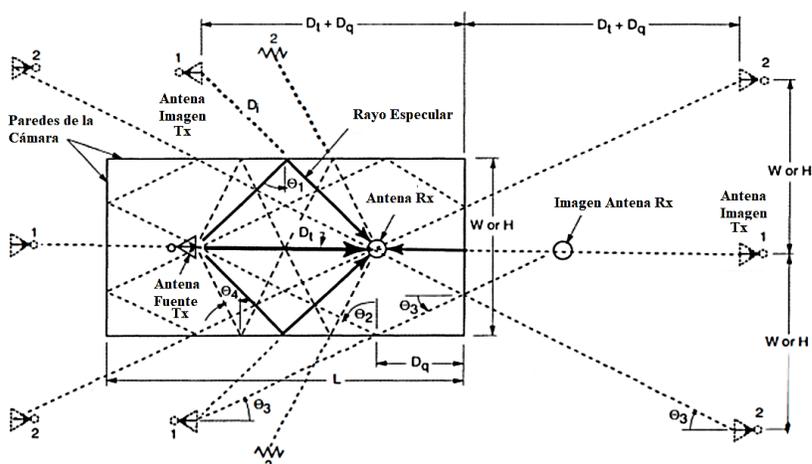


Figura 67. Múltiples Trayectorias.

Fuente: (Gaston & Julian, 2016)

La línea generada al unir una imagen de un solo salto con la antena real de transmisión, es perpendicular a la pared lateral. Y la distancia entre la antena real de transmisión a la pared es igual a la distancia entre la antena imagen y la pared de la cámara. A su vez, las imágenes de primero orden son representadas en otras paredes para formar las imágenes de dos saltos. Según la **Figura 67**, la línea proveniente de cada imagen hacia la antena de recepción, define la dirección de incidencia sobre la antena de recepción, además del punto de inflexión especular en la pared. Realizando cálculos geométricos simples se puede obtener el ángulo de incidencia sobre el absorbente. Con respecto a la imagen de doble salto que se observa en la parte inferior de la **Figura 67**, se tiene que:

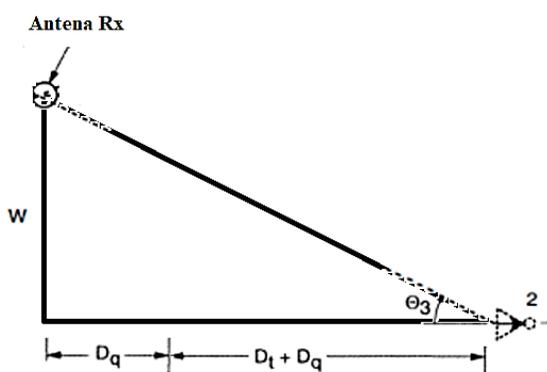


Figura 68. Ángulo de incidencia sobre el absorbente.

$$\theta_3 = \arctang\left(\frac{W}{D_t + 2D_q}\right) \quad (16)$$

Dónde: W , es el Ancho de la cámara anecoica, D_t , es la Longitud entre las antenas y D_q , es la Distancia desde la antena de recepción hacia la pared.

Remplazando los datos en la **Ecuación 16**, según las mediciones del patrón de radiación realizadas anteriormente se tiene:

$$\theta_3 = \arctang\left(\frac{3}{1 + 2 * 1}\right)$$

$$\theta_3 = \arctang\left(\frac{3}{1 + 2 * 1}\right)$$

$$\theta_3 = 45^\circ$$

El ángulo de incidencia θ_2 , es el complemento de θ_3 , por lo tanto:

$$\theta_2 = 45^\circ$$

5.2. Medición de los Parámetros de Antenas.

5.2.1. Medición de Perdidas en Cables.

En primer lugar, se realizó la medición de las pérdidas de los cables utilizados para conectar las antenas de transmisión y recepción con los equipos, debido a que son datos que son considerados en las perdidas de propagación, en la **Ecuación (1)**, para determinar la ganancia de las antenas. Se utilizó el Analizador de Redes Vectoriales HP 8714ES, para obtener el nivel de pérdidas a una frecuencia de trabajo de 2.4 GHz, se mide el nivel de potencia en el puerto 2, proveniente del puerto 1 (S21). Se conectó el cable que se desea medir entre los puertos 1 y 2 del analizador, según como se muestra en la **Figura 69**.

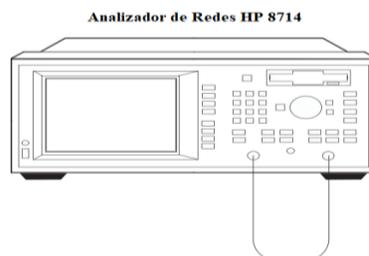


Figura 69. Medición de Pérdidas en Cables.

❖ Cable del Transmisor.

Para el cable que se utiliza como transmisor se obtuvo un nivel de pérdidas de -6.456dB , a una frecuencia de 2.4 GHz , mostrado en **Figura 70**.



Figura 70. Medición de Pérdidas en el Cable de Transmisión.

❖ Cable del Receptor.

Para el cable que se utiliza como transmisor se obtuvo un nivel de pérdidas de -3.537dB , a una frecuencia de 2.4 GHz , mostrado en **Figura 71**.



Figura 71. Medición de Pérdidas en el Cable de Recepción.

Por lo tanto, se obtuvo un total de pérdidas de cables de 9.993dB entre transmisor y receptor.

5.2.2. Medición del VSWR.

La medición del parámetro de VSWR de las antenas, se realizó utilizando el Analizador de redes Vectoriales HP8714ES, tanto en polarización vertical como horizontal, colocando la antena en el puerto 1, tal como se muestra en la **Figura 72**.

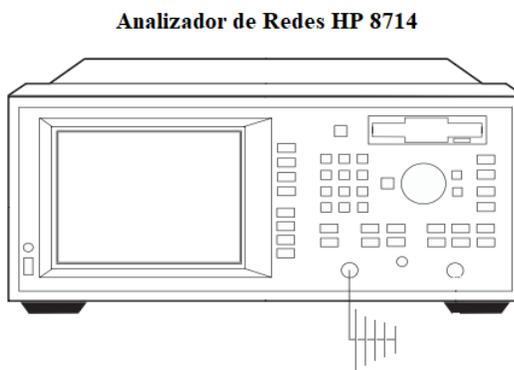


Figura 72. Medición del VSWR.

❖ Antena Yagui-Uda.

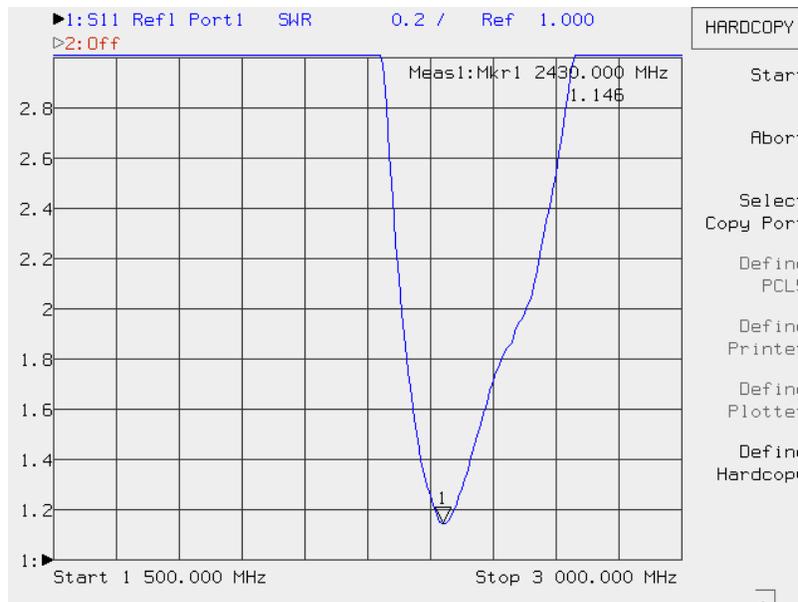


Figura 73. VSWR Antena Yagui-Uda.

Según la **Figura 73**, se observa que la antena Yagui-Uda para una frecuencia de trabajo de 2.43 Ghz, tiene un VSWR de 1.146.

A continuación, se detalla el cálculo del porcentaje de error de los resultados de la medición y la simulación del VSWR, para la antena Yagui-Uda

$$\%Error = \left| \frac{Valor\ Simulado - Valor\ Medido}{Valor\ Simulado} \right| \quad (17)$$

$$\%Error = \left| \frac{1.176 - 1.146}{1.176} \right|$$

$$\%Error = 2.625\%$$

Se verifica que el valor de error en la medición es un valor aceptable, debido que se tiene una aproximación aceptable entre los valores medidos y simulados.

❖ Antena Dipolo.

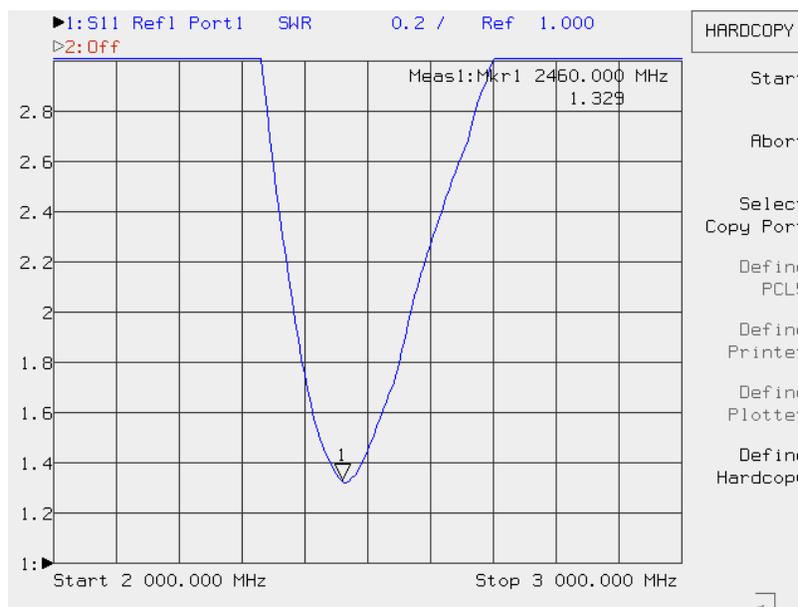


Figura 74. VSWR Antena Dipolo

Según la **Figura 74**, se observa que la antena Dipolo para una frecuencia de trabajo de 2.46 Ghz, tiene un VSWR de 1.329.

A continuación, se detalla el cálculo del porcentaje de error de los resultados de la medición y la simulación del VSWR, para la antena Dipolo.

$$\%Error = \left| \frac{1.162 - 1.329}{1.162} \right|$$

$$\%Error = 14.371\%$$

Se verifica que el valor de error en la medición es un valor aceptable, debido que se tiene una aproximación aceptable entre los valores medidos y simulados.

❖ Antena Patch.

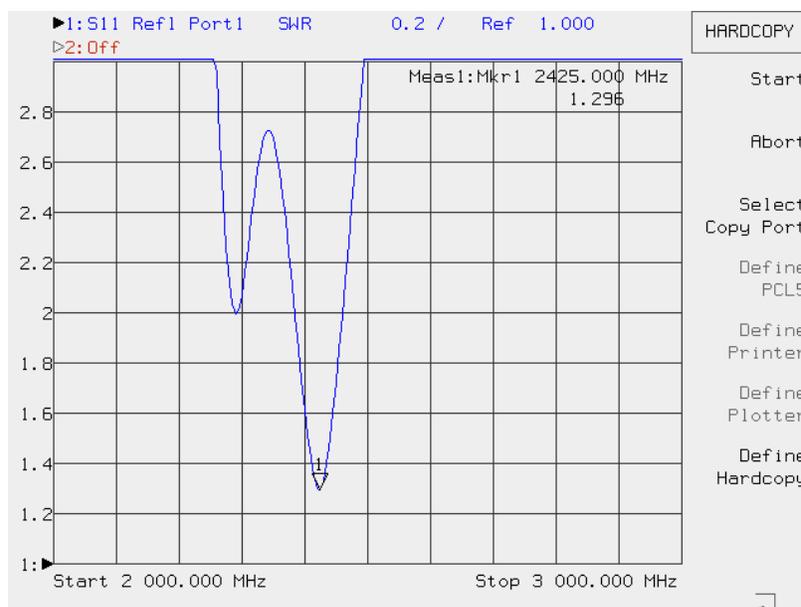


Figura 75. VSWR Antena Patch.

Según la **Figura 75**, se observa que la antena Patch para una frecuencia de trabajo de 2.425 Ghz, tiene un VSWR de 1.296.

A continuación, se detalla el cálculo del porcentaje de error de los resultados de la medición y la simulación del VSWR, para la antena Dipolo.

$$\%Error = \left| \frac{1.184 - 1.296}{1.184} \right|$$

$$\%Error = 9.459\%$$

Se verifica que las antenas se encuentran trabajando a una frecuencia de operación de 2.4 Ghz, además de que el nivel de VSWR es aceptable por ser muy próximo a la unidad que sería el valor ideal.

❖ Antena Arreglo Patch 2x1.

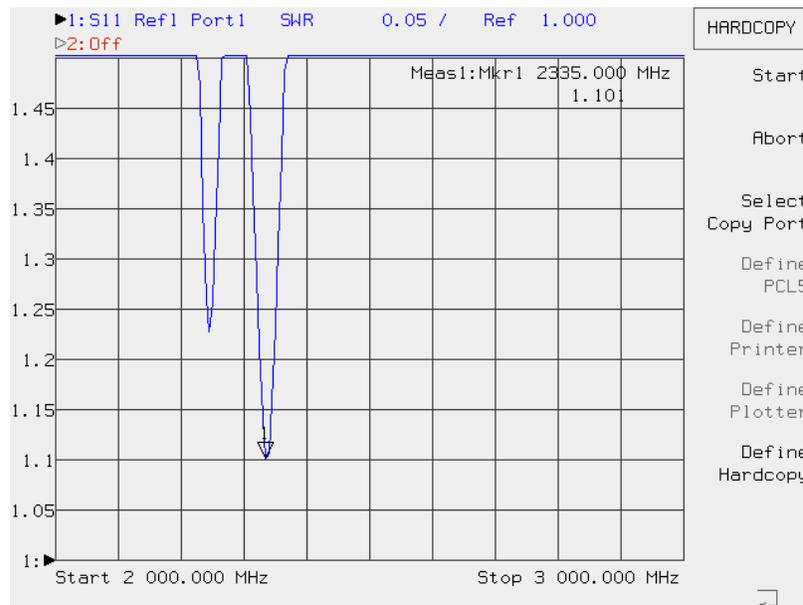


Figura 76. VSWR Antena Arreglo Patch.

Según la **Figura 76**, se observa que la antena Arreglo Patch 2x1 para una frecuencia de trabajo de 2.335 Ghz, tiene un VSWR de 1.101.

A continuación, se detalla el cálculo del porcentaje de error de los resultados de la medición y la simulación del VSWR, para la antena Dipolo.

$$\%Error = \left| \frac{1.030 - 1.101}{1.030} \right|$$

$$\%Error = 6.893\%$$

Se verifica que el valor de error en la medición es un valor aceptable, debido que se tiene una aproximación aceptable entre los valores medidos y simulados.

5.2.3. Medición de la Ganancia de Antenas.

5.2.3.1. Método de Dos Antenas.

5.2.3.1.1. Primera Metodología.

Según la primera metodología explicada anteriormente en el Capítulo III, (Figura 16), las mediciones se realizaron a una distancia de separación entre las antenas de 1 metro y con una potencia de transmisión de 0 dBm, Obteniendo los siguientes resultados.

❖ Antena Yagui-Uda.

Las mediciones con la antena Yagui-Uda, se realizaron en polarización horizontal y vertical, tal como se muestra en la **Figura 77**.



Figura 77. Antena Yagui-Uda polarización Horizontal (a) y Vertical (b)

Para la antena en polarización horizontal, se obtuvo los resultados mostrados en la **Figura 78**.

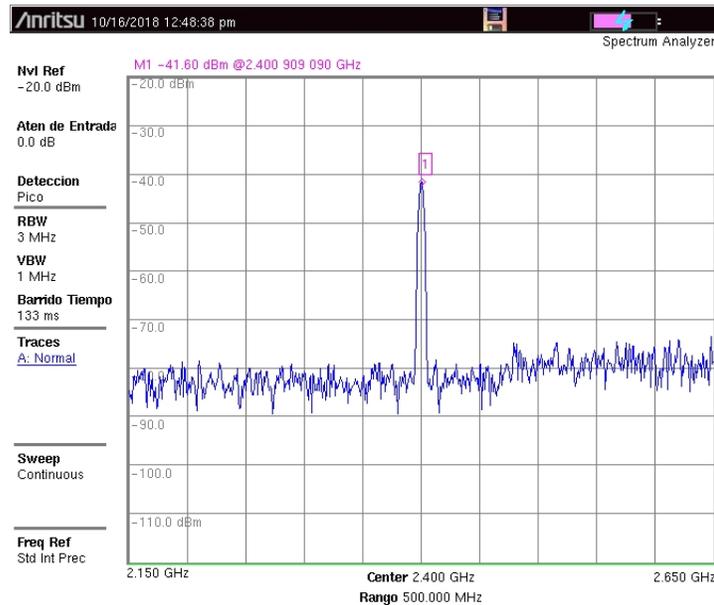


Figura 78. Señal Recibida Antena Yagui-Uda polarización horizontal.

Se observa que para una frecuencia de 2.4 Ghz se obtiene un valor de señal en la antena de recepción de -41.60 dB, realizando los cálculos mediante la aplicación de la **Ecuación (8)** se tiene:

$$G = \frac{P_{rx} - P_{tx} + L_b + L_{cables\ y\ conectores}}{2}$$

$$L_b = 92.4 + 20\text{Log}(f_{GHz}) + 20\text{Log}(d_{Km})$$

$$L_b = 92.4 + 20\text{Log}(2.45) + 20\text{Log}(1 * 10^{-3})$$

$$L_b = 40.183$$

$$G = \frac{-41.60 - 0 + 40.183 + 10 + 4}{2}$$

$$G = \frac{12.583}{2}$$

$$G = 6.291\ \text{dB} = 4.256\ \text{adimensional}$$

Para la antena en polarización vertical, se obtuvo los resultados mostrados en la **Figura 79**.

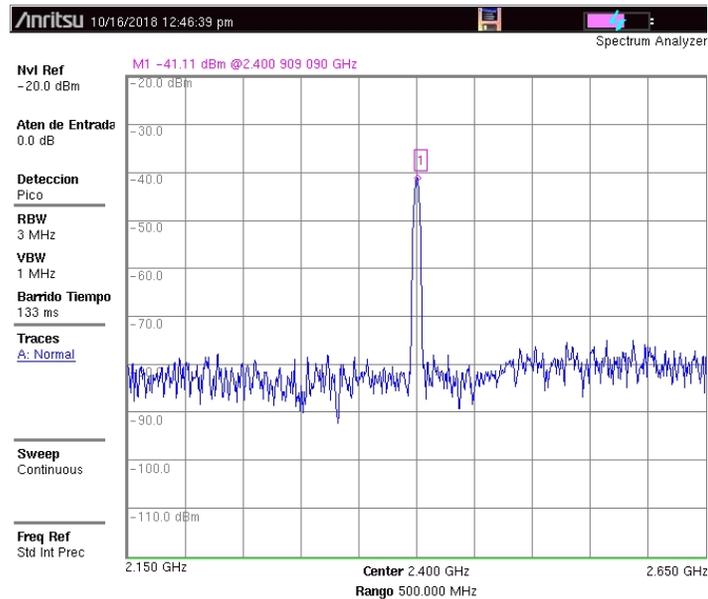


Figura 79. Señal Recibida Antena Yagui-Uda polarización vertical.

Se observa que para una frecuencia de 2.4 Ghz se obtiene un valor de señal en la antena de recepción de -41.11 dB, Realizando los cálculos mediante la aplicación de la **Ecuación (8)** se tiene:

$$G = \frac{P_{rx} - P_{tx} + L_b + L_{cables\ y\ conectores}}{2}$$

$$L_b = 40.183$$

$$G = \frac{-41.11 - 0 + 40.183 + 10 + 4}{2}$$

$$G = \frac{13.073}{2}$$

$$G = 6.536\ dB = 4.504\ adimensional$$

❖ Antena Dipolo.

Las mediciones con la antena Dipolo, se realizaron en polarización horizontal y vertical, tal como se muestra en la **Figura 80**.

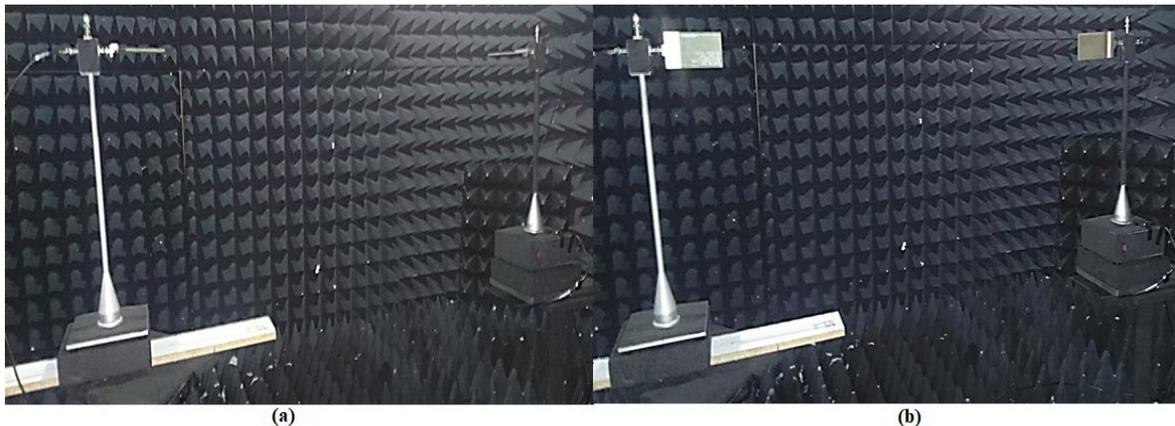


Figura 80. Antena Dipolo polarización Horizontal (a) y Vertical (b).

Para la antena en polarización horizontal, se obtuvo los resultados mostrados en la **Figura 81**.

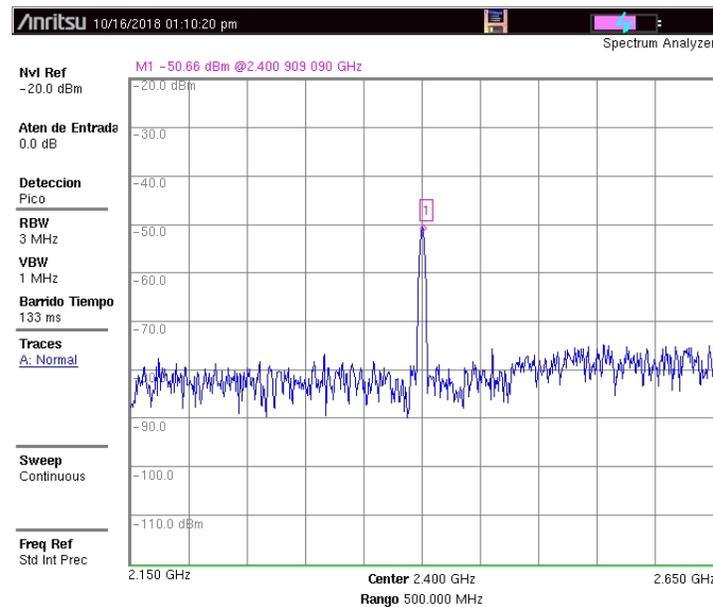


Figura 81. Señal Recibida Antena Dipolo polarización horizontal.

Se observa que para una frecuencia de 2.4 Ghz se obtiene un valor de señal en la antena de recepción de -50.66 dB, realizando los cálculos mediante la aplicación de la **Ecuación (8)** se tiene:

$$G = \frac{P_{rx} - P_{tx} + L_b + L_{cables\ y\ conectores}}{2}$$

$$L_b = 40.183$$

$$G = \frac{-50.66 - 0 + 40.183 + 10 + 4}{2}$$

$$G = \frac{3.523}{2}$$

$$G = 1.761 \text{ dB} = 1.500 \text{ adimensional}$$

Para la antena en polarización vertical, se obtuvo los resultados mostrados en la **Figura 82**.

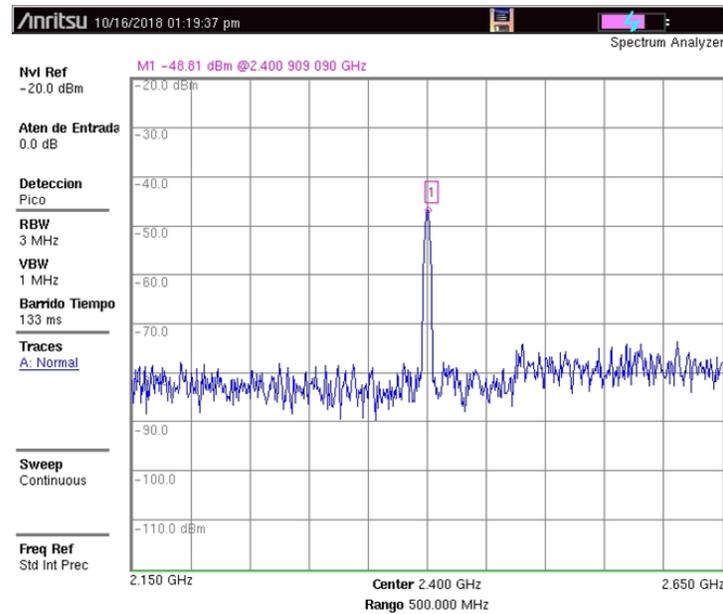


Figura 82. Señal Recibida Dipolo polarización vertical.

Se observa que para una frecuencia de 2.4 Ghz se obtiene un valor de señal en la antena de recepción de -48.81 dB, Realizando los cálculos mediante la aplicación de la **Ecuación (8)** se tiene:

$$G = \frac{P_{rx} - P_{tx} + L_b + L_{cables\ y\ conectores}}{2}$$

$$L_b = 40.183$$

$$G = \frac{-48.81 + 0 + 40.183 + 10 + 4}{2}$$

$$G = \frac{5.373}{2}$$

$$G = 2.686 \text{ dB} = 1.856 \text{ adimensional}$$

❖ Antena Patch.

Las mediciones con la antena Patch, se realizaron en polarización horizontal y vertical, tal como se muestra en la **Figura 82**.

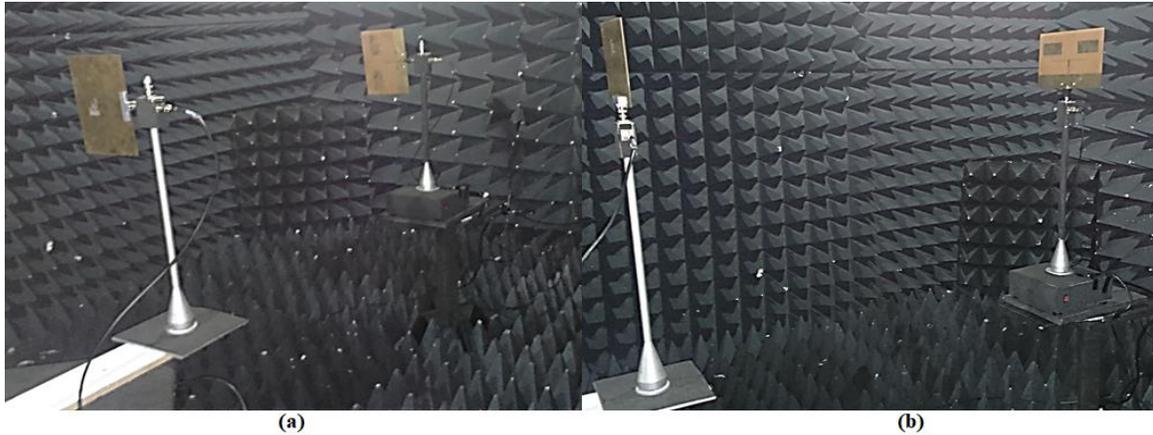


Figura 83. Antena Patch polarización Horizontal (a) y Vertical (b)

Para la antena en polarización horizontal, se obtuvo los resultados mostrados en la **Figura 84**.

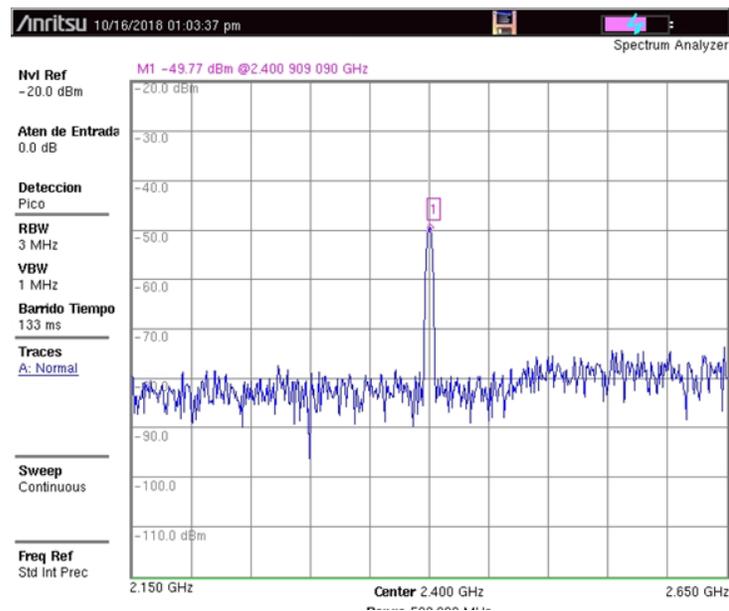


Figura 84. Señal Recibida Antena Patch polarización horizontal.

Se observa que para una frecuencia de 2.4 Ghz se obtiene un valor de señal en la antena de recepción de -49.77 dB, realizando los cálculos mediante la aplicación de la **Ecuación (8)** se tiene:

$$G = \frac{P_{rx} - P_{tx} + L_b + L_{cables\ y\ conectores}}{2}$$

$$L_b = 40.183$$

$$G = \frac{-49.77 - 0 + 40.183 + 10 + 4}{2}$$

$$G = \frac{6.41}{2}$$

$$G = 3.205 \text{ dB} = 2.091 \text{ adimensional}$$

Para la antena en polarización vertical, se obtuvo los resultados mostrados en la **Figura 85**.

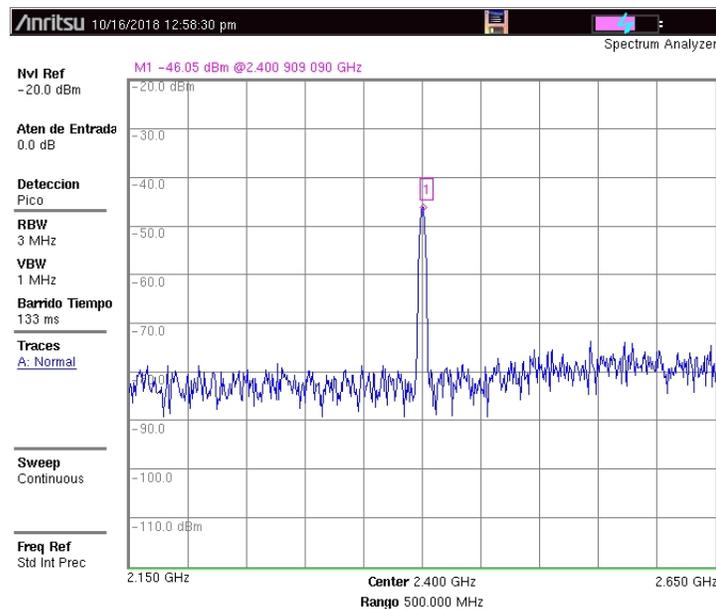


Figura 85. Señal Recibida Antena Patch polarización vertical.

Se observa que para una frecuencia de 2.4 Ghz se obtiene un valor de señal en la antena de recepción de -46.05 dB, Realizando los cálculos mediante la aplicación de la **Ecuación (8)** se tiene:

$$G = \frac{P_{rx} - P_{tx} + L_b + L_{cables \ y \ conectores}}{2}$$

$$L_b = 40.183$$

$$G = \frac{-46.05 + 0 + 40.183 + 10 + 4}{2}$$

$$G = \frac{8.133}{2}$$

$$G = 4.066\text{dB} = 2.550 \text{ adimensional}$$

❖ Antena Arreglo Patch 2x1.

Las mediciones con la antena Arreglo Patch 2x1, se realizaron en polarización horizontal y vertical, tal como se muestra en la **Figura 86**.

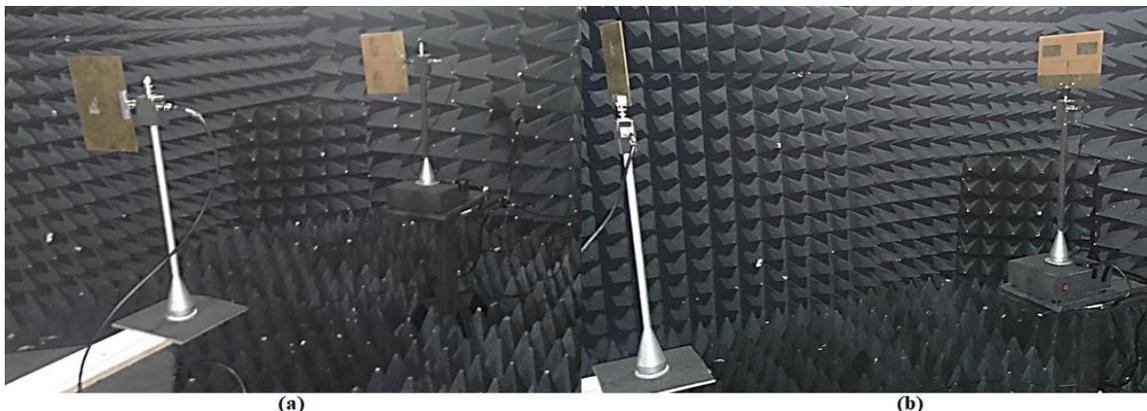


Figura 86. Antena Arreglo Patch 2x1 polarización Horizontal (a) y Vertical (b).

Para la antena, en polarización horizontal, se obtuvo los resultados mostrados en la **Figura 87**.

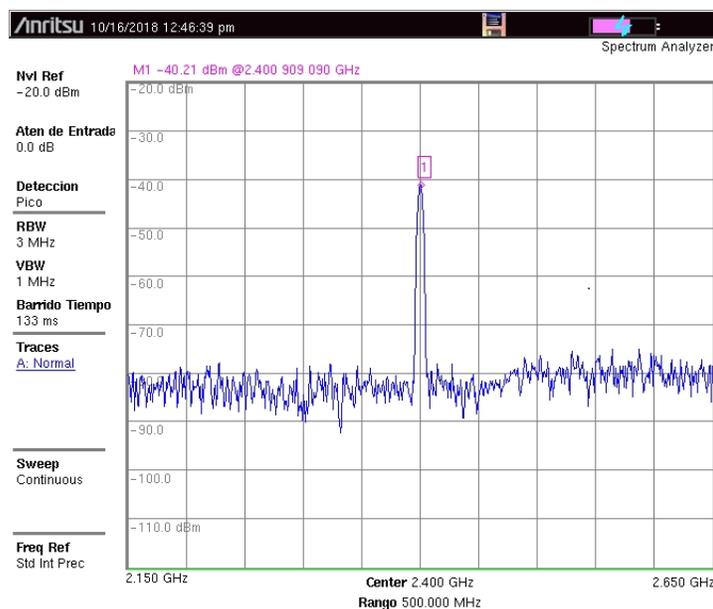


Figura 87. Señal Recibida Antena Arreglo Patch 2x1 polarización horizontal.

Se observa que para una frecuencia de 2.4 GHz se obtiene un valor de señal en la antena de recepción de -40.21 dB, realizando los cálculos mediante la aplicación de la **Ecuación (8)** se tiene:

$$G = \frac{P_{rx} - P_{tx} + L_b + L_{cables\ y\ conectores}}{2}$$

$$L_b = 40.183$$

$$G = \frac{-40.21 - 0 + 40.183 + 10 + 4}{2}$$

$$G = \frac{13.973}{2}$$

$$G = 6.986\ dB = 4.995\ adimensional$$

Para la antena en polarización vertical, se obtuvo los resultados mostrados en la **Figura 88**.

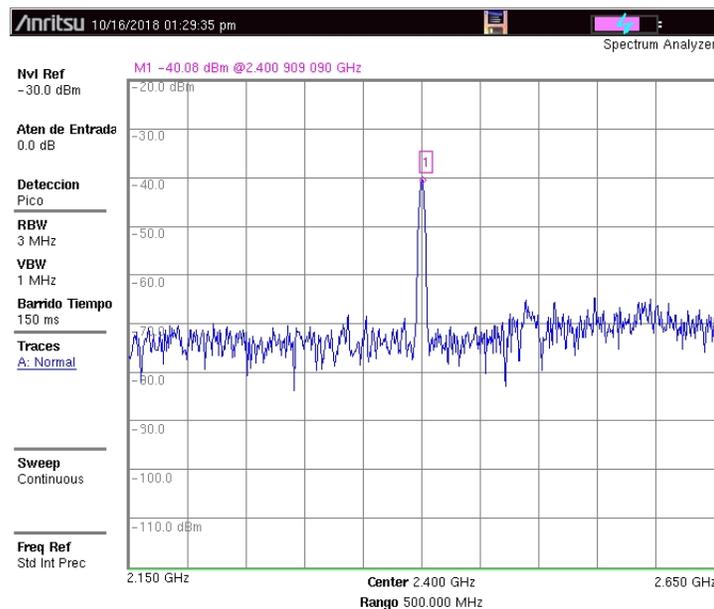


Figura 88. Señal Recibida Arreglo Patch 2x1 polarización vertical.

Se observa que para una frecuencia de 2.4 Ghz se obtiene un valor de señal en la antena de recepción de -40.08 dB, Realizando los cálculos mediante la aplicación de la **Ecuación (8)** se tiene:

$$G = \frac{P_{rx} - P_{tx} + L_b + L_{cables\ y\ conectores}}{2}$$

$$L_b = 40.183$$

$$G = \frac{-40.08 + 0 + 40.183 + 10 + 4}{2}$$

$$G = \frac{14.103}{2}$$

$$G = 7.051 \text{ dB} = 5.071 \text{ adimensional}$$

5.2.3.1.2. Segunda Metodología.

Según la segunda metodología explicada anteriormente en el Capítulo III, (**Figura 17**), las mediciones se realizaron a una distancia de separación entre las antenas de 1 metro, Obteniendo los siguientes resultados.

❖ Antena Yagui-Uda.

Las mediciones con la antena Yagui-Uda, se realizaron en polarización horizontal y vertical, tal como se mostró en la **Figura 77**.

Para la antena en polarización horizontal, se obtuvo los resultados mostrados en la **Figura 89**.

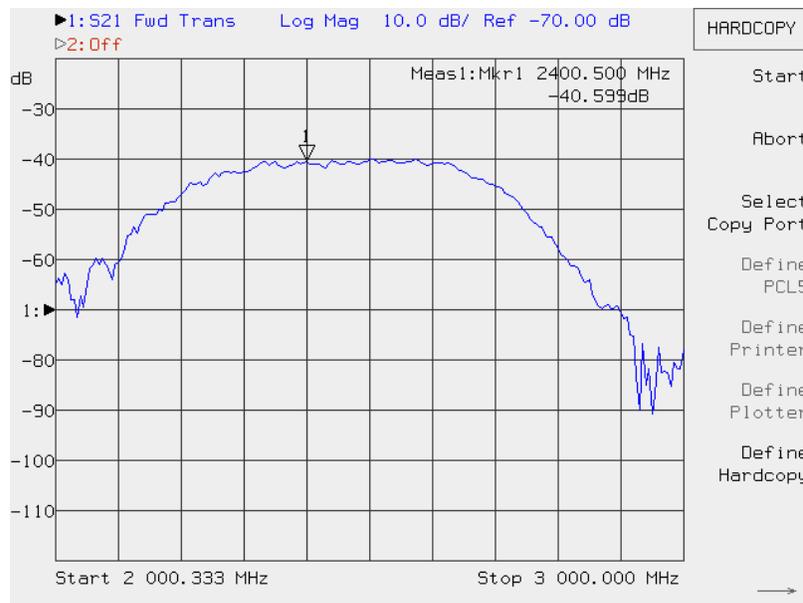


Figura 89. S₂₁ Antena Yagui-Uda polarización horizontal.

Se observa que para una frecuencia de 2.4 Ghz se obtiene un valor del parámetro S₂₁ de -40.599 dB, realizando los cálculos mediante la aplicación de la **Ecuación (12)**, se obtiene:

$$G = \frac{S_{21} + L_b + L_{\text{cables y conectores}}}{2}$$

$$L_b = 40.183$$

$$G = \frac{-40.599 + 40.183 + 10 + 4}{2}$$

$$G = \frac{13.584}{2}$$

$$G = 6.792 \text{ dB} = 4.777 \text{ adimensional}$$

Para la antena en polarización vertical, se obtuvo los resultados mostrados en la **Figura 90**.

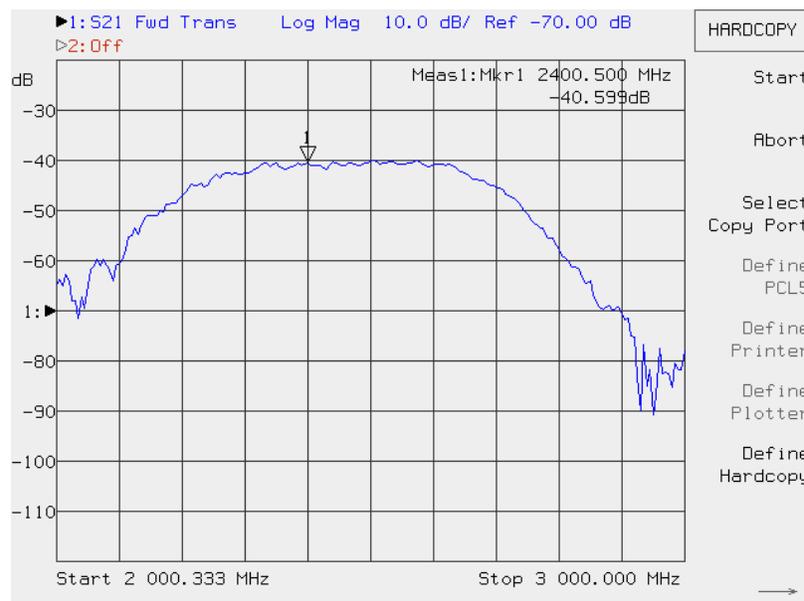


Figura 90. S_{21} Antena Yagui-Uda polarización vertical.

Se observa que para una frecuencia de 2.4 Ghz se obtiene un valor del parámetro S_{21} de -40.599 dB, realizando los cálculos mediante la aplicación de la **Ecuación (12)**, se obtiene:

$$G = \frac{S_{21} + L_b + L_{\text{cables y conectores}}}{2}$$

$$L_b = 40.183$$

$$G = \frac{-40.599 + 40.183 + 10 + 4}{2}$$

$$G = \frac{13.584}{2}$$

$$G = 6.792 \text{ dB} = 4.777 \text{ adimensional}$$

❖ Antena Dipolo.

Las mediciones con la antena Dipolo, se realizaron en polarización horizontal y vertical, tal como se mostró en la **Figura 80**.

Para la antena en polarización horizontal, se obtuvo los resultados mostrados en la **Figura 91**.

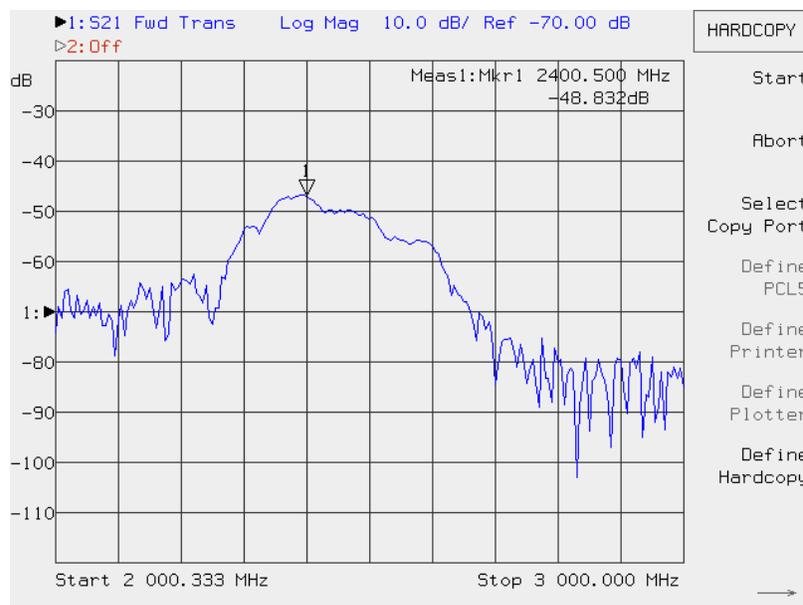


Figura 91. S_{21} Antena Dipolo polarización horizontal.

Se observa que para una frecuencia de 2.4 Ghz se obtiene un valor del parámetro S_{21} de -48.832 dB, realizando los cálculos mediante la aplicación de la **Ecuación (12)**, se obtiene:

$$G = \frac{S_{21} + L_b + L_{\text{cables y conectores}}}{2}$$

$$L_b = 40.183$$

$$G = \frac{-48.832 + 40.183 + 10 + 4}{2}$$

$$G = \frac{5.351}{2}$$

$$G = 2.675 \text{ dB} = 1.851 \text{ adimensional}$$

Para la antena en polarización vertical, se obtuvo los resultados mostrados en la **Figura 92**.

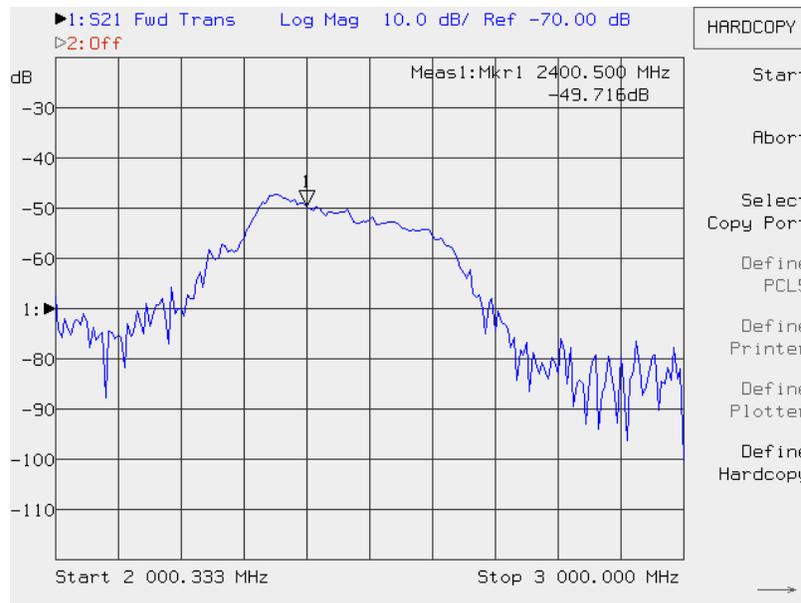


Figura 92. S_{21} Antena Dipolo polarización vertical.

Se observa que para una frecuencia de 2.4 Ghz se obtiene un valor del parámetro S_{21} de -49.716 dB, realizando los cálculos mediante la aplicación de la **Ecuación (12)**, se obtiene:

$$G = \frac{S_{21} + L_b + L_{\text{cables y conectores}}}{2}$$

$$L_b = 40.183$$

$$G = \frac{-49.716 + 40.183 + 10 + 4}{2}$$

$$G = \frac{4.467}{2}$$

$$G = 2.233 \text{ dB} = 1.672 \text{ adimensional}$$

❖ Antena Patch.

Las mediciones con la antena Patch, se realizaron en polarización horizontal y vertical, tal como se mostró en la **Figura 83**.

Para la antena en polarización horizontal, se obtuvo los resultados mostrados en la **Figura 93**.

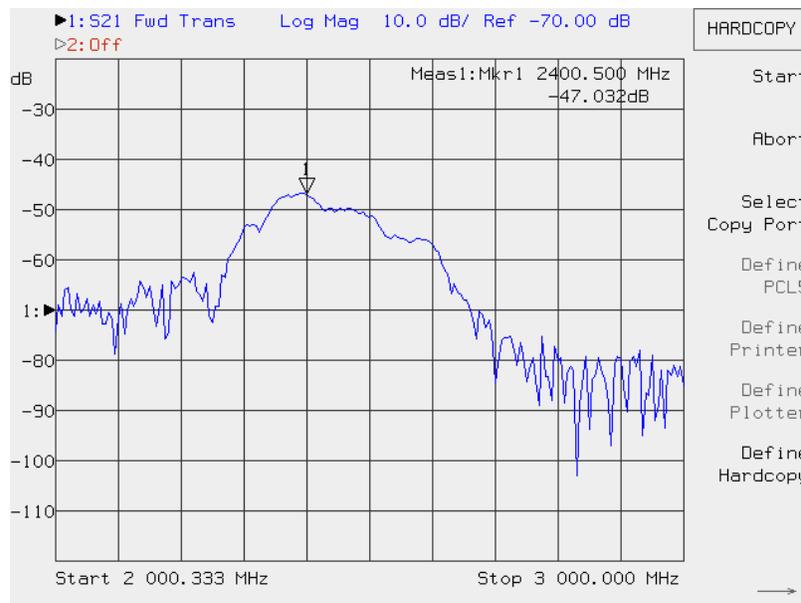


Figura 93. S_{21} Antena Patch polarización horizontal.

Se observa que para una frecuencia de 2.4 GHz se obtiene un valor del parámetro S_{21} de -47.032 dB, realizando los cálculos mediante la aplicación de la **Ecuación (12)**, se obtiene:

$$G = \frac{S_{21} + L_b + L_{\text{cables y conectores}}}{2}$$

$$L_b = 40.183$$

$$G = \frac{-47.032 + 40.183 + 10 + 4}{2}$$

$$G = \frac{7.151}{2}$$

$$G = 3.575 \text{ dB} = 2.277 \text{ adimensional}$$

Para la antena en polarización vertical, se obtuvo los resultados mostrados en la **Figura 94**.

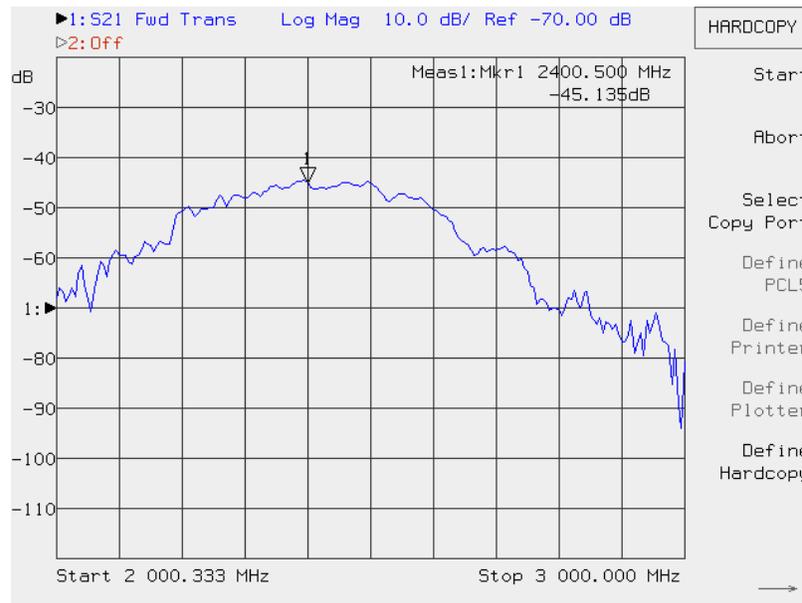


Figura 94. S_{21} Antena Patch polarización vertical.

Se observa que para una frecuencia de 2.4 Ghz se obtiene un valor del parámetro S_{21} de -45.135 dB, realizando los cálculos mediante la aplicación de la **Ecuación (12)**, se obtiene:

$$G = \frac{S_{21} + L_b + L_{\text{cables y conectores}}}{2}$$

$$L_b = 40.183$$

$$G = \frac{-45.135 + 40.183 + 10 + 4}{2}$$

$$G = \frac{9.048}{2}$$

$$G = 4.524 \text{ dB} = 2.834 \text{ adimensional}$$

❖ Antena Arreglo Patch 2x1.

Las mediciones con la antena Arreglo Patch 2x1, se realizaron en polarización horizontal y vertical, tal como se mostró en la **Figura 86**.

Para la antena en polarización horizontal, se obtuvo los resultados mostrados en la **Figura 95**.

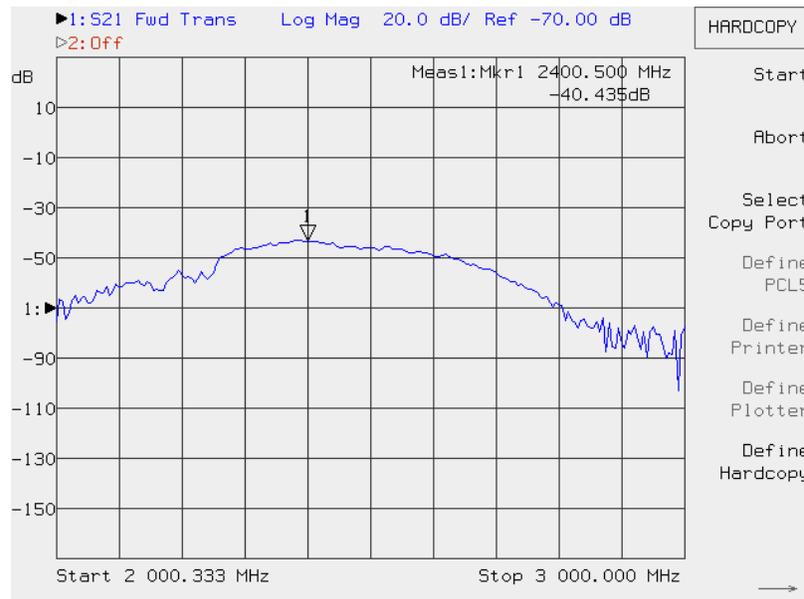


Figura 95. S₂₁ Antena Arreglo Patch 2x1 polarización horizontal.

Se observa que para una frecuencia de 2.4 Ghz se obtiene un valor del parámetro S₂₁ de -40.435 dB, realizando los cálculos mediante la aplicación de la **Ecuación (12)**, se obtiene:

$$G = \frac{S_{21} + L_b + L_{\text{cables y conecores}}}{2}$$

$$L_b = 40.183$$

$$G = \frac{-40.435 + 40.183 + 10 + 4}{2}$$

$$G = \frac{13.748}{2}$$

$$G = 6.874 \text{ dB} = 4.868 \text{ adimensional}$$

Para la antena Arreglo Patch 2x1, en polarización vertical, se obtuvo los resultados que se muestra en la **Figura 96**.

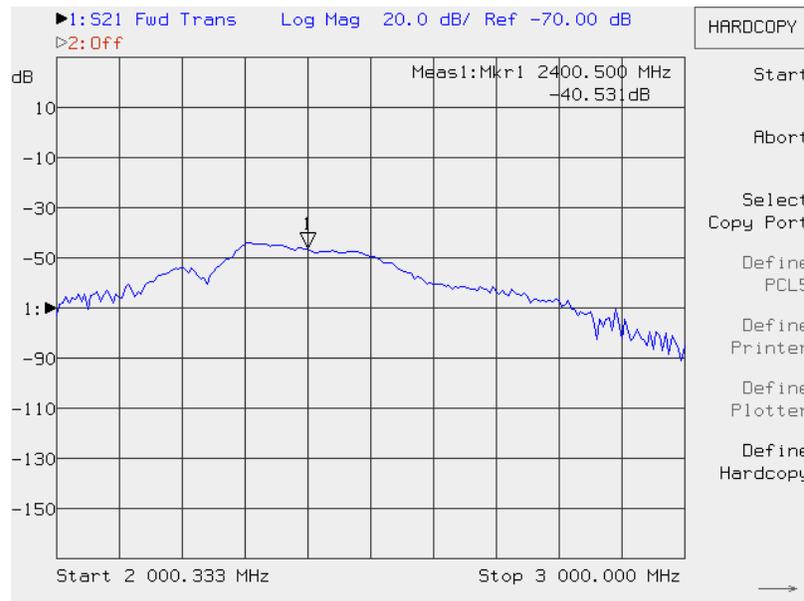


Figura 96. S_{21} Antena Arreglo Patch 2x1 polarización vertical.

Se observa que para una frecuencia de 2.4 Ghz se obtiene un valor del parámetro S_{21} de -40.531 dB, realizando los cálculos mediante la aplicación de la **Ecuación (12)**, se obtiene:

$$G = \frac{S_{21} + L_b + L_{\text{cables y conectores}}}{2}$$

$$L_b = 40.183$$

$$G = \frac{-40.531 + 40.183 + 10 + 4}{2}$$

$$G = \frac{13.652}{2}$$

$$G = 6.826 \text{ dB} = 4.815 \text{ adimensional}$$

5.2.3.2. Método de Tres Antenas.

Tal como se detalló en el Capítulo III, se procedió a colocar tres antenas separadas una distancia de 1 metro. Se planteó cinco escenarios, los cuales son mostrados a continuación.

❖ Primer Escenario.

Para el caso del primer escenario se utilizó una antena Patch simple en la posición 1 dos antenas Arreglo Patch de 1x2, en las posiciones dos y tres respectivamente tal como se muestra en la **Figura 97**.

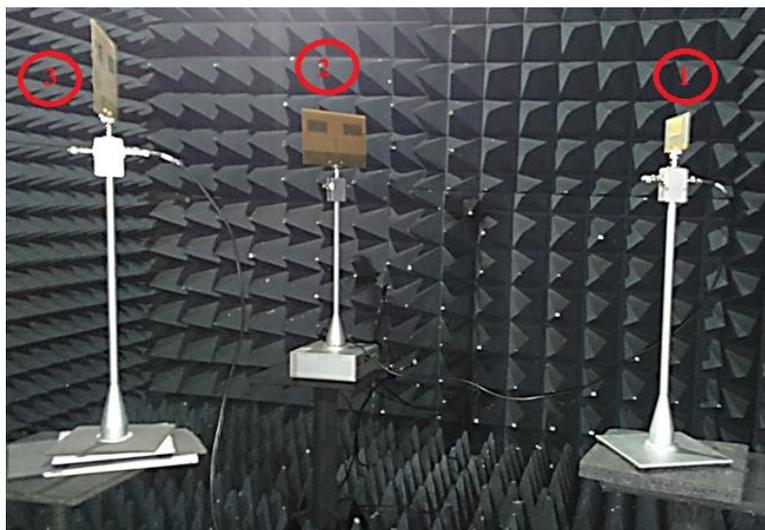


Figura 97. Primer Escenario Método de Tres Antenas.

Al realizar la medición de la antena 1 a la antena 2 se obtuvo el siguiente resultado, mostrado en la **Figura 98**.

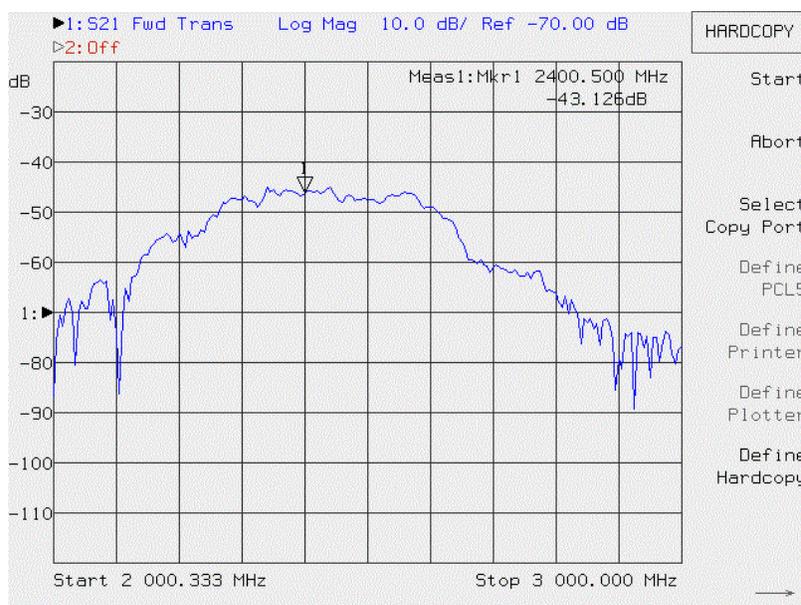


Figura 98. Primer Escenario Medida M_{12} .

Se observa que el valor del S_{21} entre la Antena 1 y la Antena 2 es de $M_{12} = -43.126$

Al realizar la medición de la antena 1 a la antena 3 se obtuvo el siguiente resultado, mostrado en la **Figura 99**.

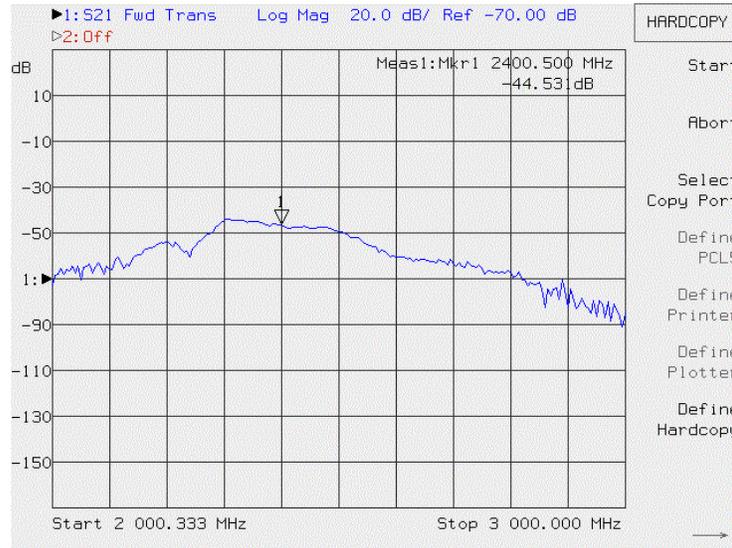


Figura 99. Primer Escenario Medida M_{13} .

Se observa que el valor del S_{21} entre la Antena 1 y la Antena 3 es de $M_{13} = -44.531$

Al realizar la medición de la antena 2 a la antena 3 se obtuvo el siguiente resultado, mostrado en la **Figura 100**.

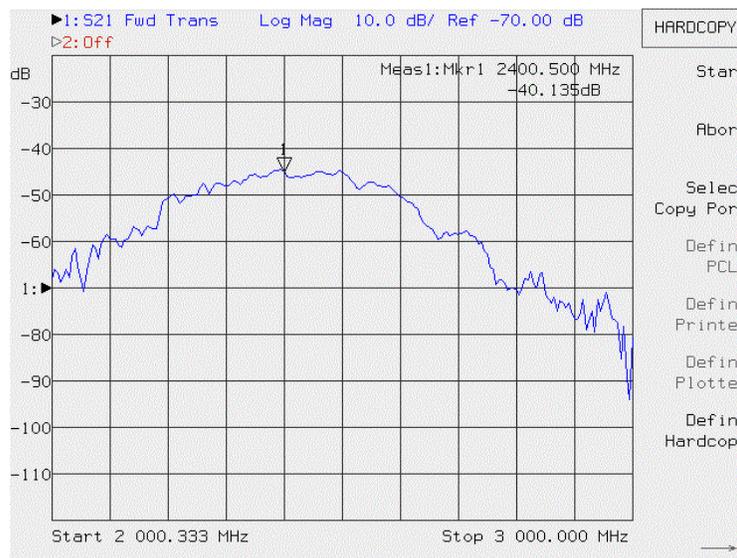


Figura 100. Primer Escenario Medida M_{23} .

Se observa que el valor del S_{21} entre la antena 2 y la antena 3 es de $M_{23} = -40.135$

Por lo tanto al realizar el cálculo aplicando las **Ecuaciones (13), (14) y (15)**, se obtiene el resultado de las ganancias de las antenas.

$$G_{ant1} = \frac{M_{12} + M_{13} - M_{23} + L_b + L_{cables\ y\ conectores}}{2}$$

$$G_{ant1} = \frac{(-43.126) + (-44.531) - (-40.135) + (40.183 + 10 + 4)}{2}$$

$$G_{ant1} = \frac{6.661}{2}$$

$$G_{ant1} = 3.330\ dB = 2.153\ adimensional$$

$$G_{ant2} = \frac{M_{12} - M_{13} + M_{23} + L_b + L_{cables\ y\ conectores}}{2}$$

$$G_{ant2} = \frac{(-43.126) - (-44.531) + (-40.135) + (40.183 + 10 + 4)}{2}$$

$$G_{ant2} = \frac{15.453}{2}$$

$$G_{ant2} = 7.726\ dB = 5.924\ adimensional$$

$$G_{ant3} = \frac{-M_{12} + M_{13} + M_{23} + L_b + L_{cables\ y\ conectores}}{2}$$

$$G_{ant3} = \frac{-(-43.126) + (-44.531) + (-40.135) + (40.183 + 10 + 4)}{2}$$

$$G_{ant3} = \frac{12.643}{2}$$

$$G_{ant3} = 6.3215\ dB = 4.286\ adimensional$$

Según los resultados obtenidos entonces para la antena Patch simple se obtuvo una ganancia de 3.330 db o 2.153 en adimensional y para la antena Arreglo Patch se realiza un promedio de las dos

ganancias obtenidas, debido a que son antenas de las mismas características, obteniendo una ganancia de 7.080 dB o 5.105 en adimensional.

❖ Segundo Escenario.

Para el caso del segundo escenario se utilizó una antena Dipolo en la posición uno y dos antenas Arreglo Patch de 1x2, en las posiciones dos y tres respectivamente.

Al realizar la medición de la antena 1 a la antena 2 se obtuvo el siguiente resultado, mostrado en la **Figura 101**.

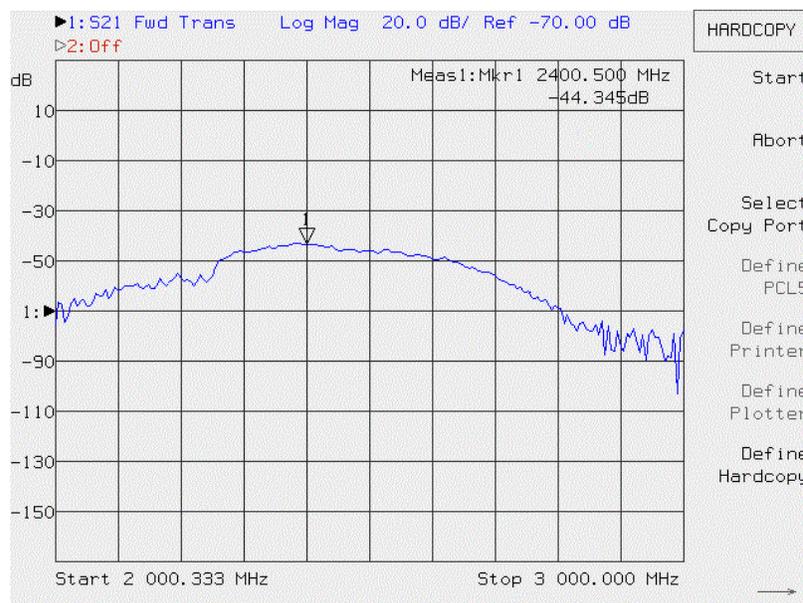


Figura 101. Segundo Escenario Medida M_{12} .

Se observa que el valor del S_{21} entre la Antena 1 y la Antena 2 es de $M_{12} = -44.345$

Al realizar la medición de la antena 1 a la antena 3 se obtuvo el siguiente resultado, mostrado en la **Figura 102**.

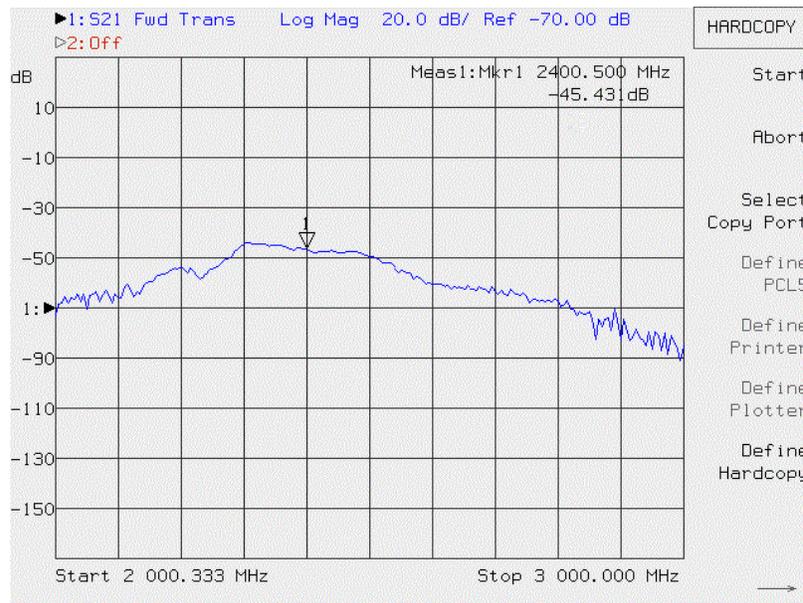


Figura 102. Segundo Escenario Medida M_{13} .

Se observa que el valor del S_{21} entre la Antena 1 y la Antena 3 es de $M_{13} = -45.431$

Al realizar la medición de la antena 2 a la antena 3 se obtuvo el siguiente resultado, mostrado en la **Figura 103**.

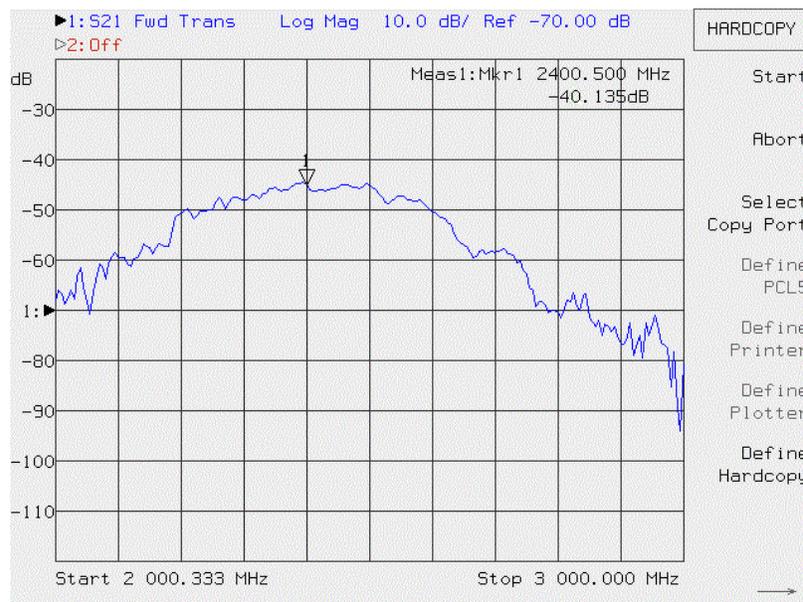


Figura 103. Segundo Escenario Medida M_{23} .

Se observa que el valor del S_{21} entre la antena 2 y la antena 3 es de $M_{23} = -40.135$

Por lo tanto al realizar el cálculo aplicando las **Ecuaciones (13), (14) y (15)**, se obtiene el resultado de las ganancias de las antenas.

$$G_{ant1} = \frac{M_{12} + M_{13} - M_{23} + L_b + L_{cables\ y\ conectores}}{2}$$

$$G_{ant1} = \frac{(-44.345) + (-45.431) - (-40.135) + (40.183 + 10 + 4)}{2}$$

$$G_{ant1} = \frac{4.542}{2}$$

$$G_{ant1} = 2.271\ dB = 1.686\ adimensional$$

$$G_{ant2} = \frac{M_{12} - M_{13} + M_{23} + L_b + L_{cables\ y\ conectores}}{2}$$

$$G_{ant2} = \frac{(-44.345) - (-45.431) + (-40.135) + (40.183 + 10 + 4)}{2}$$

$$G_{ant2} = \frac{15.134}{2}$$

$$G_{ant2} = 7.567\ dB = 5.710\ adimensional$$

$$G_{ant3} = \frac{-M_{12} + M_{13} + M_{23} + L_b + L_{cables\ y\ conectores}}{2}$$

$$G_{ant3} = \frac{-(-44.345) + (-45.431) + (-40.135) + (40.183 + 10 + 4)}{2}$$

$$G_{ant1} = \frac{12.962}{2}$$

$$G_{ant1} = 6.481\ dB = 4.447\ adimensional$$

Según los resultados obtenidos entonces para la antena Dipolo obtuvo una ganancia de 2.271 dB o 1.686 en adimensional y para la antena Arreglo Patch se realiza un promedio de las dos

ganancias obtenidas, debido a que son antenas de las mismas características, obteniendo una ganancia de 7.024 dB o 5.039 en adimensional.

❖ Tercer Escenario.

Para el caso del tercer escenario se utilizó una antena Yagui-Uda en la posición uno y dos antenas Arreglo Patch de 1x2, en las posiciones dos y tres respectivamente.

Al realizar la medición de la antena 1 a la antena 2 se obtuvo el siguiente resultado, mostrado en la **Figura 104**.

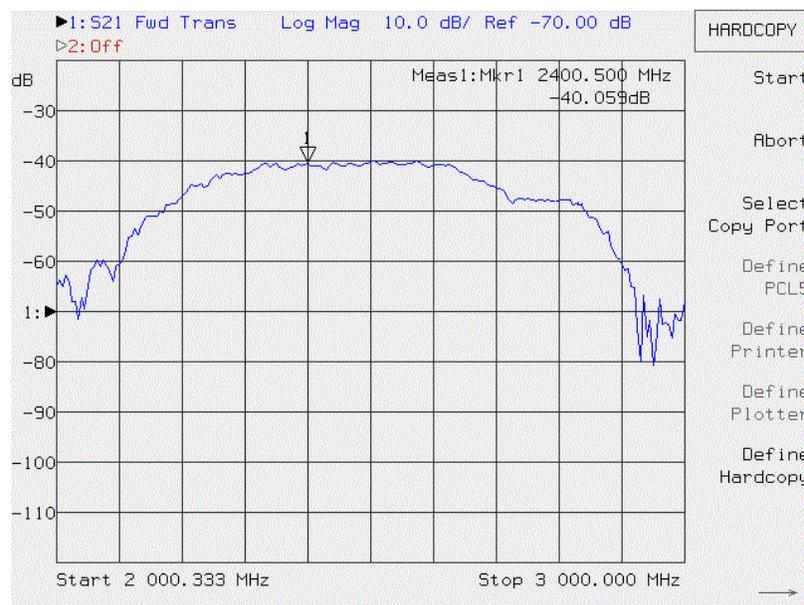


Figura 104. Tercer Escenario Medida M_{12} .

Se observa que el valor del S_{21} entre la Antena 1 y la Antena 2 es de $M_{12} = -40.059$

Al realizar la medición de la antena 1 a la antena 3 se obtuvo el siguiente resultado, mostrado en la **Figura 105**.

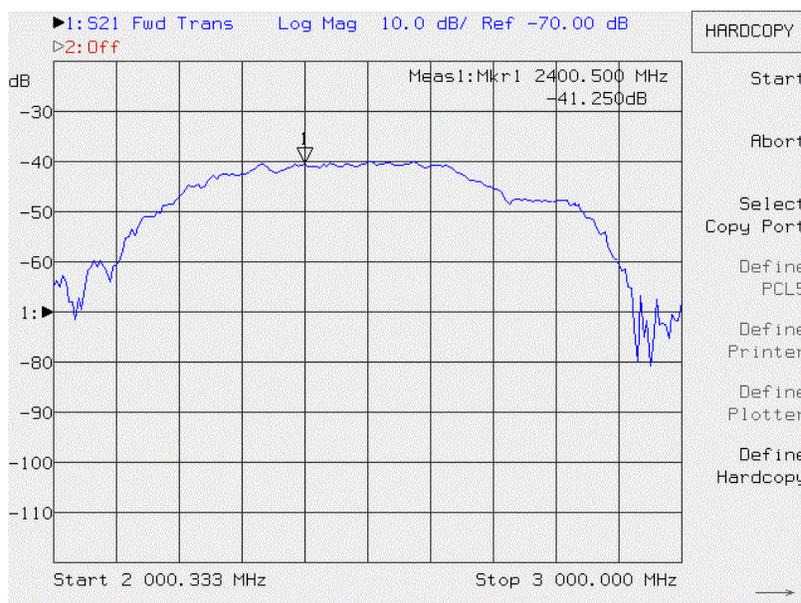


Figura 105. Tercer Escenario Medida M_{13} .

Se observa que el valor del S_{21} entre la Antena 1 y la Antena 3 es de $M_{13} = -41.250$

Al realizar la medición de la antena 2 a la antena 3 se obtuvo el siguiente resultado, mostrado en la **Figura 106**.

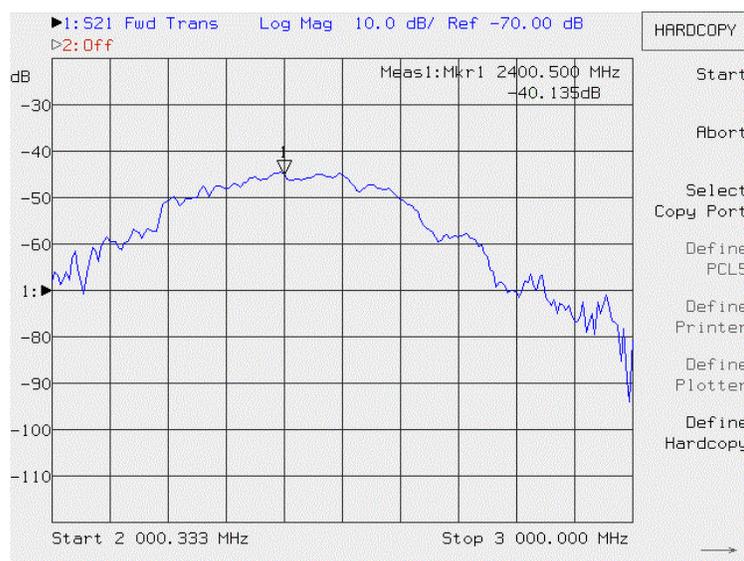


Figura 106. Tercer Escenario Medida M_{23} .

Se observa que el valor del S_{21} entre la antena 2 y la antena 3 es de $M_{23} = -40.135$

Por lo tanto al realizar el cálculo aplicando las **Ecuaciones (13), (14) y (15)**, se obtiene el resultado de las ganancias de las antenas.

$$G_{ant1} = \frac{M_{12} + M_{13} - M_{23} + L_b + L_{cables\ y\ conectores}}{2}$$

$$G_{ant1} = \frac{(-40.059) + (-41.250) - (-40.135) + (40.183 + 10 + 4)}{2}$$

$$G_{ant1} = \frac{13.009}{2}$$

$$G_{ant1} = 6.804\ dB = 4.471\ adimensional$$

$$G_{ant2} = \frac{M_{12} - M_{13} + M_{23} + L_b + L_{cables\ y\ conectores}}{2}$$

$$G_{ant2} = \frac{(-40.059) - (-41.250) + (-40.135) + (40.183 + 10 + 4)}{2}$$

$$G_{ant2} = \frac{15.239}{2}$$

$$G_{ant2} = 7.619\ dB = 5.780\ adimensional$$

$$G_{ant3} = \frac{-M_{12} + M_{13} + M_{23} + L_b + L_{cables\ y\ conectores}}{2}$$

$$G_{ant3} = \frac{-(-40.059) + (-41.250) + (-40.135) + (40.183 + 10 + 4)}{2}$$

$$G_{ant1} = \frac{12.857}{2}$$

$$G_{ant1} = 6.428\ dB = 4.393\ adimensional$$

Según los resultados obtenidos entonces para la antena Yagui-Uda, se obtuvo una ganancia de 6.504 dB o 4.471 en adimensional y para la antena Arreglo Patch se realiza un promedio de las dos

ganancias obtenidas, debido a que son antenas de las mismas características, obteniendo una ganancia de 7.064 dB o 5.087 en adimensional.

❖ Cuarto Escenario.

Para el caso del cuarto escenario se utilizó una antena Dipolo en la posición número uno, una antena Yaqui-Uda, en la posición número dos y una antena Patch simple en la posición tres.

Al realizar la medición de la antena 1 a la antena 2 se obtuvo el siguiente resultado, mostrado en la **Figura 107**.

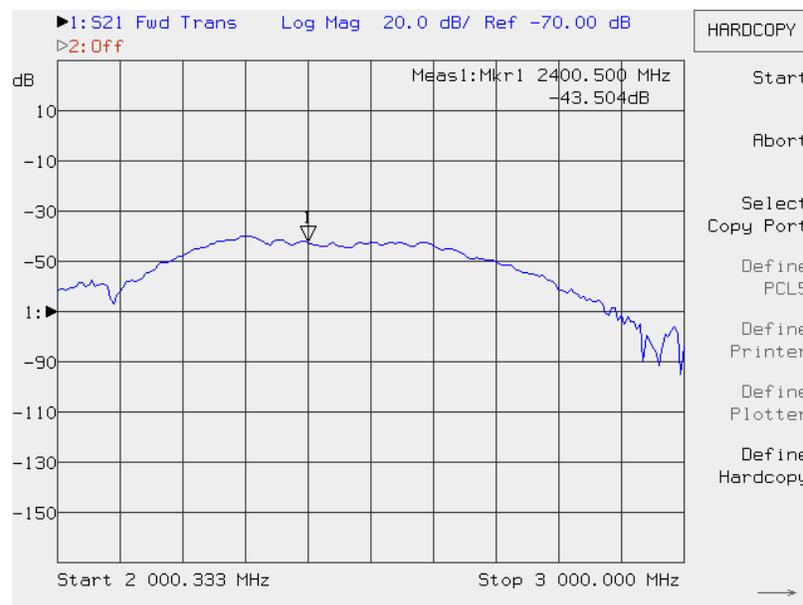


Figura 107. Cuarto Escenario Método de Tres Antenas.

Se observa que el valor del S_{21} entre la Antena 1 y la Antena 2 es de $M_{12} = -43.504$

Al realizar la medición de la antena 1 a la antena 3 se obtuvo el siguiente resultado, mostrado en la **Figura 108**.

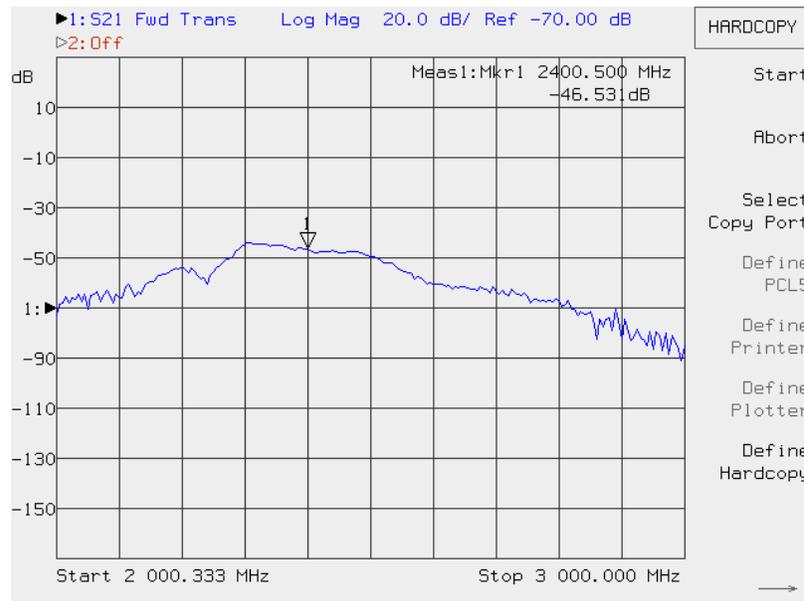


Figura 108. Cuarto Escenario Método de Tres Antenas.

Se observa que el valor del S_{21} entre la Antena 1 y la Antena 3 es de $M_{13} = -46.531$

Al realizar la medición de la antena 2 a la antena 3 se obtuvo el siguiente resultado, mostrado en la **Figura 109**.

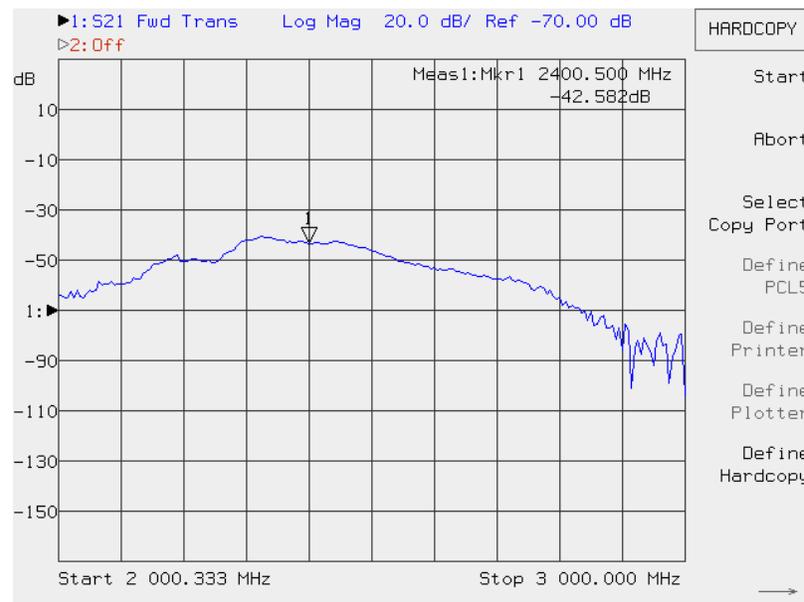


Figura 109. Cuarto Escenario Método de Tres Antenas.

Se observa que el valor del S_{21} entre la antena 2 y la antena 3 es de $M_{23} = -42.582$

Por lo tanto al realizar el cálculo aplicando las **Ecuaciones (13), (14) y (15)**, se obtiene el resultado de las ganancias de las antenas.

$$G_{ant1} = \frac{M_{12} + M_{13} - M_{23} + L_b + L_{cables\ y\ conectores}}{2}$$

$$G_{ant1} = \frac{(-43.504) + (-46.531) - (-42.582) + (40.183 + 10 + 4)}{2}$$

$$G_{ant1} = \frac{5.73}{2}$$

$$G_{ant1} = 2.865\ dB = 1.934\ adimensional$$

$$G_{ant2} = \frac{M_{12} - M_{13} + M_{23} + L_b + L_{cables\ y\ conectores}}{2}$$

$$G_{ant2} = \frac{(-43.504) - (-46.531) + (-42.582) + (42.183 + 10 + 4)}{2}$$

$$G_{ant2} = \frac{15.628}{2}$$

$$G_{ant2} = 7.814\ dB = 6.045\ adimensional$$

$$G_{ant3} = \frac{-M_{12} + M_{13} + M_{23} + L_b + L_{cables\ y\ conectores}}{2}$$

$$G_{ant3} = \frac{-(-43.504) + (-46.531) + (-42.582) + (42.183 + 10 + 4)}{2}$$

$$G_{ant1} = \frac{7.574}{2}$$

$$G_{ant1} = 3.787\ dB = 2.391\ adimensional$$

Según los resultados obtenidos entonces para la antena Dipolo, se obtuvo una ganancia de 2.865 dB o 1.934 en adimensional, para la antena Yagui-Uda una ganancia de 7.814 dB o 6.045 adimensional y por ultimo para la antena Patch una ganancia de 3.787 dB o 2.391 en adimensional.

A continuación, se presenta los resultados de la medición de la ganancia de antenas con cada metodología aplicada. En la **Tabla 27**, se presenta los resultados de las mediciones al aplicar las dos técnicas disponibles en el método de las dos antenas.

Tabla 27.
Ganancia de antena aplicando el Método de dos Antenas.

Antena	Simulación		Método Dos Antenas							
			Técnica 1				Técnica 2			
	dB	Adm	P Horizontal		P Vertical		P Horizontal		P Vertical	
Yagui-Uda	8,207	6,617	6,291	4,256	6,536	4,504	6,792	4,777	6,792	4,777
Dipolo	2,076	1,162	1,761	1,500	2,686	1,856	2,675	1,851	2,233	1,672
Patch	4,468	2,797	3,205	2,091	4,066	2,550	3,575	2,277	4,524	2,834
Patch 2x1	8,371	6,872	6,986	4,995	7,051	5,071	6,874	4,868	6,826	4,815

Se observa que los valores de ganancia para el caso de la antena Yagui-Uda en polarización horizontal y vertical, en la técnica 1 y 2, difiere en aproximadamente en 2 unidades, con respecto al valor simulado adimensional. Para la antena Dipolo, se observa que existe una diferencia de aproximadamente 0.6 unidades con respecto al valor simulado adimensional. Para el caso de la antena Patch, se verifica que existe una diferencia aproximada de 0.5 unidades con respecto al valor simulado adimensional. Por último, para el caso de la antena Arreglo Patch 2x1, se observa que se tiene una diferencia aproximada de 2 unidades, con respecto al valor simulado adimensional. Se puede considerar que la diferencia presente en las mediciones, es debido a que los valores que se obtienen en la simulación son máximos e ideales para cada tipo de antena, mientras que los valores obtenidos en una medición, siempre van a presentar pérdidas por cables, conectores, etc.

Se procede a realizar el cálculo de los errores , de las mediciones según los resultados obtenidos y se procede a mostrarlos en la **Tabla 28**.

Tabla 28.

Error de las mediciones al aplicar el Método de Dos Antenas.

Antena	Método Dos Antenas			
	Técnica 1		Técnica 2	
	P. Horizontal % Error	P. Vertical % Error	P. Horizontal % Error	P. Vertical % Error
Yagui-Uda	35,681	31,933	27,807	27,807
Dipolo	29,088	59,725	59,294	43,890
Patch	25,241	8,831	18,591	1,323
Patch 2x1	27,314	26,208	29,162	29,933

Se observa que, a pesar de tener una diferencia máxima de dos unidades adimensionales, los valores de errores presentados son relativamente altos, por lo que se puede concluir que la metodología de dos antenas para el cálculo de la ganancia no es confiable.

En la **Tabla 29**, se presenta los resultados obtenidos al aplicar el método de las tres antenas para el cálculo de la ganancia.

Tabla 29.

Ganancia de antena aplicando el Método de Tres Antenas.

Metodología de tres antenas	Ganancia		
	dB	adimensional	
Escenario 1	Patch	3,33	2,153
	Arreglo Patch 2x1	7,726	5,924
	Arreglo Patch 2x1	6,325	4,286
Escenario 2	Dipolo	2,271	1,686
	Arreglo Patch 2x1	7,567	5,71
	Arreglo Patch 2x1	6,481	4,447
Escenario 3	Yagui-Uda	6,804	4,471
	Arreglo Patch 2x1	7,619	5,78
	Arreglo Patch 2x1	6,428	4,393
Escenario 4	Dipolo	2,865	1,934
	Yagui-Uda	7,814	6,045
	Patch	3,787	2,391

Según los resultados obtenidos, se observa que la antena Yagui-Uda, presenta una ganancia aproximada de 7 dB, la antena Dipolo presenta una ganancia aproximada de 2.5 dB, la antena Patch presenta una ganancia de 3.5 dB y por último el Arreglo Patch 2x1 presenta una ganancia aproximada de 7.5 dB. Valores que resultan mucho más cercanos a los simulados a comparación

con la metodología de dos antenas. En la **Tabla 30**, se muestra los valores promedios de la ganancias de las antenas, los valores de la ganancias obtenidos en la simulación y el porcentaje de error de las mediciones.

Tabla 30.

Error en la Ganancia de antena aplicando el Método de Tres Antenas.

Antena	Simulación		Método de tres antenas		Porcentaje de Error
	dB	Adimensional	dB	Adimensional	
Yagui-Uda	8,207	6,617	7,208	5,258	20,538
Dipolo	2,076	1,162	2,577	1,810	55,766
Patch	4,468	2,797	3,564	2,272	18,770
Patch 2x1	8,371	6,872	7,709	5,900	14,141

Según se observa existe una mejor aproximación al valor de la simulación, para la antena Yagui-Uda presenta una diferencia de 1 unidad a comparación con el valor adimensional simulado, para la antena Dipolo existe una diferencia de 0.7 unidades, para la antena Patch se verifica que presenta una diferencia de 0.5 unidades y por último el Arreglo Patch presenta una diferencia de 1 unidad. A pesar de que el error se puede considerar alto, es mucho menor al error presentado al aplicar la metodología de dos antenas, por lo tanto, se considera que la ganancia obtenida a partir del método de tres antenas es una medición confiable.

5.2.4. Medición del Patrón de Radiación y Directividad.

Como ya se realizó la validación de la cámara anecoica, llegando a un nivel aceptable de confiabilidad en las mediciones, se procedió a realizar la medición del diagrama de radiación para cada una de las antenas.

Con la medición del diagrama de radiación se procedió a calcular la directividad de cada antena, aplicando la **Ecuación (5)**. Cada medición se realizó a una distancia de separación de un metro.

❖ Antena Yagui-Uda.

En la **Figura 110**, se muestra los patrones de radiación en polarización horizontal y vertical para la antena Yagui-Uda.

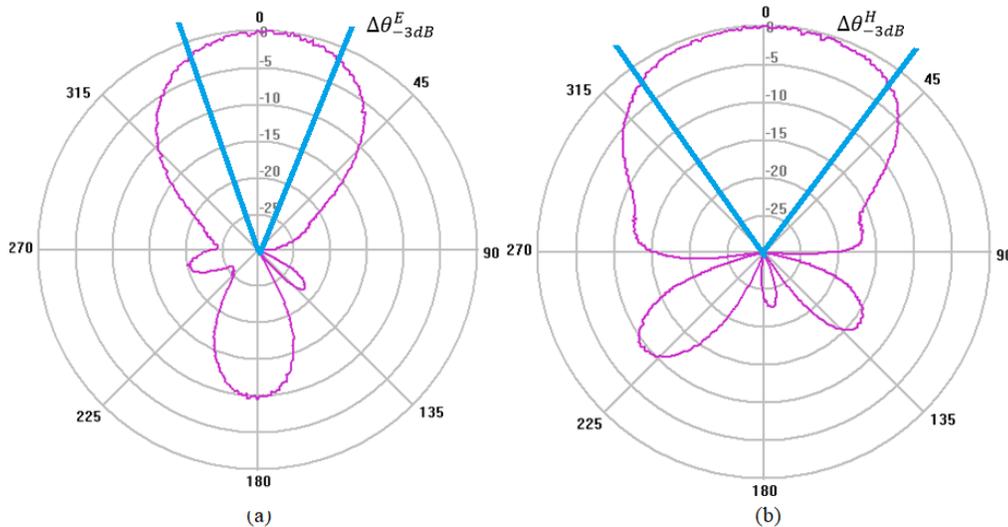


Figura 110. Diagrama de radiación Yagui-Uda Polarización Horizontal (a) y Vertical (b)

En el diagrama de radiación en polarización horizontal y vertical se mide el Ancho de haz de media potencia para proceder a calcular la Directividad de la siguiente manera:

$$\Delta\theta_{-3dB}^E = 50^\circ$$

$$\Delta\theta_{-3dB}^H = 80^\circ$$

$$D = \frac{4\pi}{\Delta\theta_{-3dB}^E * \Delta\theta_{-3dB}^H}$$

$$D = \frac{4\pi}{\frac{50 * \pi}{180} * \frac{80 * \pi}{180}}$$

$$D = 10.133 \text{ dB} = 10.313 \text{ adimensional}$$

❖ Antena Dipolo.

En la **Figura 111**, se muestra los patrones de radiación en polarización horizontal y vertical para la antena Dipolo.

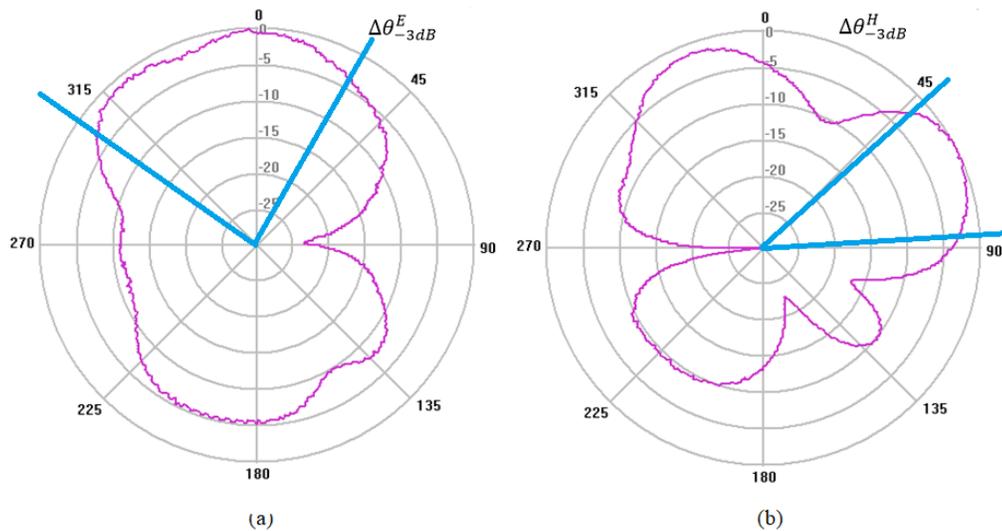


Figura 111. Diagrama de radiación Dipolo Polarización Horizontal (a) y Vertical (b)

En el diagrama de radiación en polarización horizontal y vertical se mide el Ancho de haz de media potencia para proceder a calcular la Directividad de la siguiente manera:

$$\Delta\theta_{-3dB}^E = 84^\circ$$

$$\Delta\theta_{-3dB}^H = 42^\circ$$

$$D = \frac{4\pi}{\Delta\theta_{-3dB}^E * \Delta\theta_{-3dB}^H}$$

$$D = \frac{4\pi}{\frac{84 * \pi}{180} * \frac{42 * \pi}{180}}$$

$$D = 10.679 \text{ dB} = 11.693 \text{ adimensional}$$

❖ Antena Patch.

En la **Figura 112**, se muestra los patrones de radiación en polarización horizontal y vertical para la antena Patch.

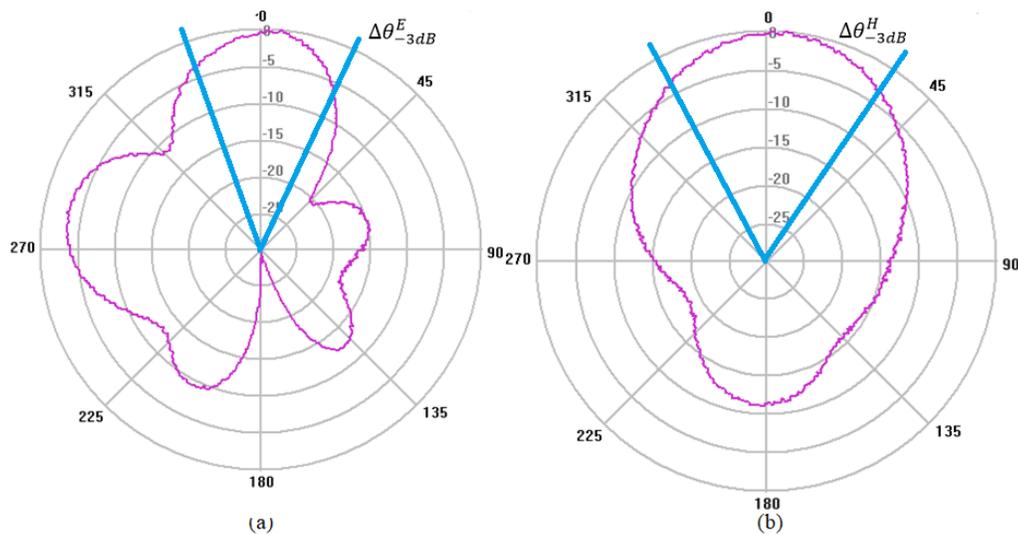


Figura 112. (a) Diagrama de radiación Antena Patch Polarización Horizontal. y Vertical (b)

En el diagrama de radiación en polarización horizontal y vertical se mide el Ancho de haz de media potencia para proceder a calcular la Directividad de la siguiente manera:

$$\Delta\theta_{-3dB}^E = 42^\circ$$

$$\Delta\theta_{-3dB}^H = 62^\circ$$

$$D = \frac{4\pi}{\Delta\theta_{-3dB}^E * \Delta\theta_{-3dB}^H}$$

$$D = \frac{4\pi}{\frac{42 * \pi}{180} * \frac{62 * \pi}{180}}$$

$$D = 11.998 \text{ dB} = 15.842 \text{ adimensional}$$

❖ Antena Arreglo Patch 2x1.

En la **Figura 113**, se muestra los patrones de radiación en polarización horizontal y vertical para la antena Arreglo Patch 2x1.

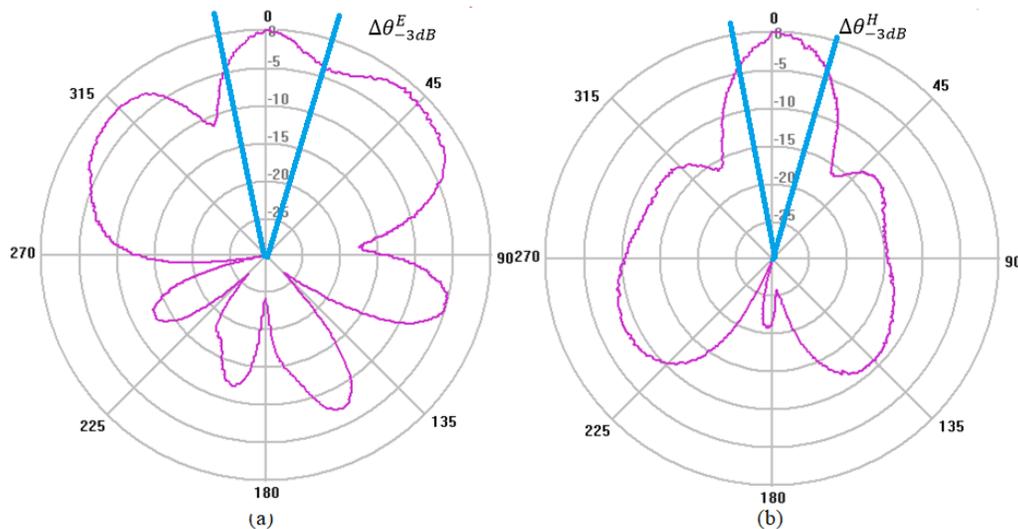


Figura 113. Diagrama de radiación Arreglo Patch Polarización Horizontal (a) y Vertical (b)

En el diagrama de radiación en polarización horizontal y vertical se mide el Ancho de haz de media potencia para proceder a calcular la Directividad de la siguiente manera:

$$\Delta\theta_{-3dB}^E = 27^\circ$$

$$\Delta\theta_{-3dB}^H = 24^\circ$$

$$D = \frac{4\pi}{\Delta\theta_{-3dB}^E * \Delta\theta_{-3dB}^H}$$

$$D = \frac{4\pi}{\frac{27 * \pi}{180} * \frac{24 * \pi}{180}}$$

$$D = 18.038 \text{ dB} = 63.66 \text{ adimensional}$$

En la **Tabla 31**, se presenta el porcentaje de erro entre los valores de directividad, obtenidos a partir del diagrama de radiación y los valores simulados.

Tabla 31.
Porcentaje de error de la Directividad.

Antena	Directividad Calculada		Directividad Simulada		Porcentaje de Error
	dB	Adimensional	dB	Adimensional	
Yagui-Uda	10,133	10,313	8,9	7,762	24,736
Dipolo	10,679	11,693	4,948	3,124	73,283

Continua →

Patch	11,998	15,842	7,908	6,1773	61,007
Patch 2x1	18,038	63,66	8,721	7,447	88,302

Se puede observar que se presenta un error relativamente alto, esto se debe a que a pesar de que ya se realizó los trabajos necesarios en la cámara para para realizar mediciones, con un nivel de confiabilidad aceptable, las gráficas del patrón de radiación obtenidas no presentan una simetría tolerable con respecto al eje vertical, además de presentar ciertas distorsiones, esto se debe a que se tiene un valor muy elevado de pérdidas de cables y conectores, por este motivo se realizó las mediciones del patrón de radiación aumentando un amplificador de 10 dB en el transmisor, para compensar dichas perdidas obteniendo los siguientes resultados.

❖ Antena Yagui-Uda.

En la **Figura 114**, se muestra los patrones de radiación en polarización horizontal y vertical para la antena Yagui-Uda.

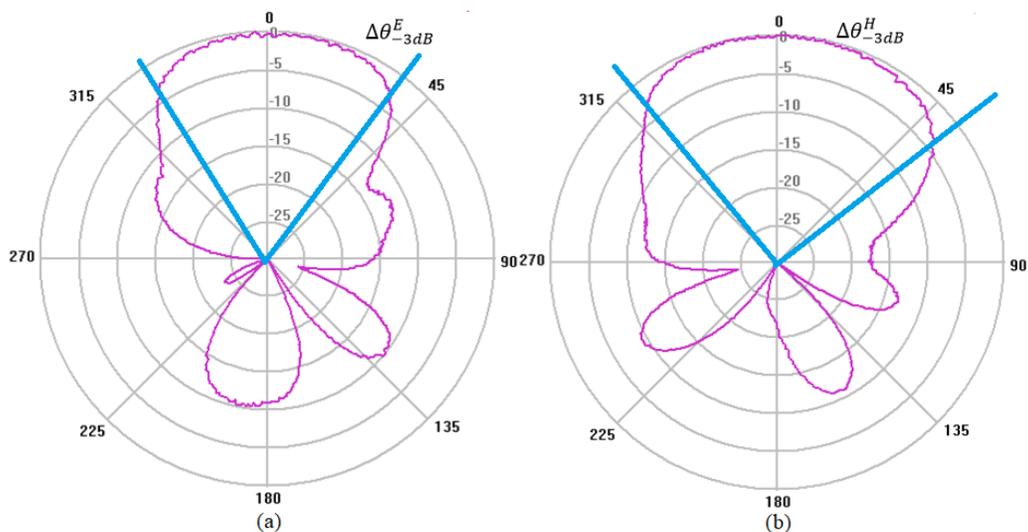


Figura 114. Diagrama de radiación Yagui-Uda Polarización Horizontal (a) y Vertical (b)

En el diagrama de radiación en polarización horizontal y vertical se mide el Ancho de haz de media potencia para proceder a calcular la Directividad de la siguiente manera:

$$\Delta\theta_{-3dB}^E = 68^\circ$$

$$\Delta\theta_{-3dB}^H = 90^\circ$$

$$D = \frac{4\pi}{\Delta\theta_{-3dB}^E * \Delta\theta_{-3dB}^H}$$

$$D = \frac{4\pi}{\frac{68 * \pi}{180} * \frac{90 * \pi}{180}}$$

$$D = 8.287dB = 6.740 \text{ adimensional}$$

❖ Antena Dipolo.

En la **Figura 115**, se muestra los patrones de radiación en polarización horizontal y vertical para la antena Dipolo.

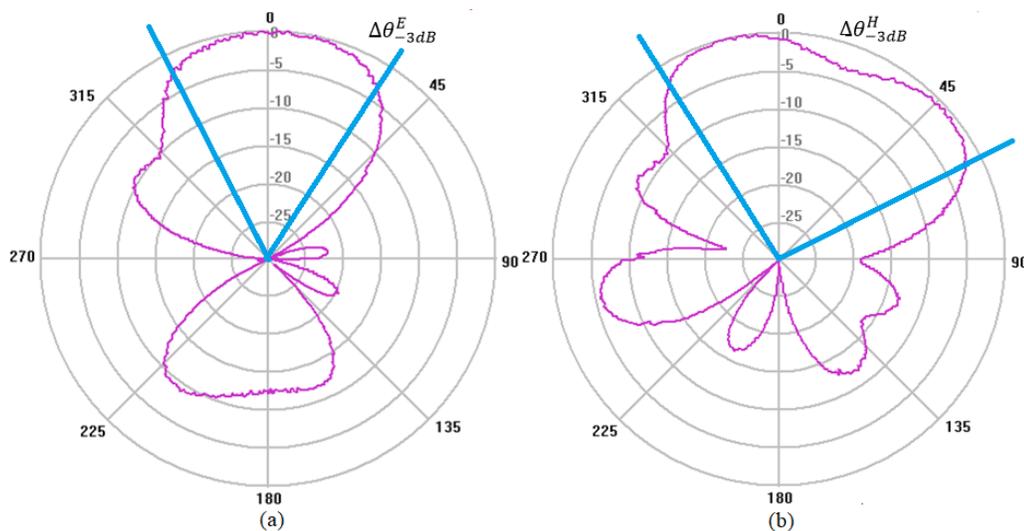


Figura 115. Diagrama de radiación Dipolo Polarización Horizontal (a) y Vertical (b).

En el diagrama de radiación en polarización horizontal y vertical se mide el Ancho de haz de media potencia para proceder a calcular la Directividad de la siguiente manera:

$$\Delta\theta_{-3dB}^E = 65^\circ$$

$$\Delta\theta_{-3dB}^H = 101^\circ$$

$$D = \frac{4\pi}{\Delta\theta_{-3dB}^E * \Delta\theta_{-3dB}^H}$$

$$D = \frac{4\pi}{\frac{65 * \pi}{180} * \frac{101 * \pi}{180}}$$

$$D = 7.982 \text{ dB} = 6.283 \text{ adimensional}$$

❖ Antena Patch.

En la **Figura 116**, se muestra los patrones de radiación en polarización horizontal y vertical para la antena Patch.

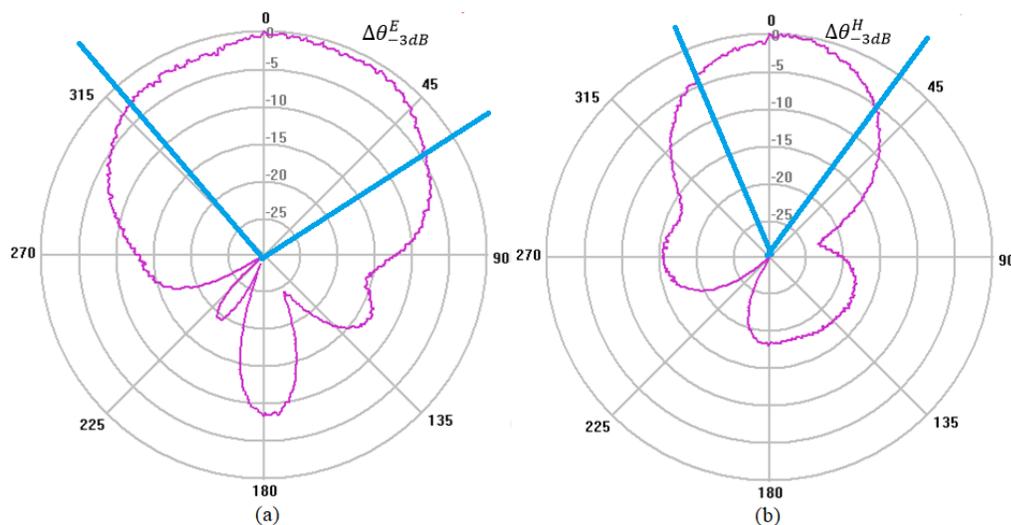


Figura 116. Diagrama de radiación Patch Polarización Horizontal (a) y Vertical (b).

En el diagrama de radiación en polarización horizontal y vertical se mide el Ancho de haz de media potencia para proceder a calcular la Directividad de la siguiente manera:

$$\Delta\theta_{-3dB}^E = 99^\circ$$

$$\Delta\theta_{-3dB}^H = 56^\circ$$

$$D = \frac{4\pi}{\Delta\theta_{-3dB}^E * \Delta\theta_{-3dB}^H}$$

$$D = \frac{4\pi}{\frac{99 * \pi}{180} * \frac{56 * \pi}{180}}$$

$$D = 8.716 \text{ dB} = 7.441 \text{ adimensional}$$

❖ **Antena Arreglo Patch 2x1.**

En la **Figura 117**, se muestra los patrones de radiación en polarización horizontal y vertical para la antena Arreglo Patch 2x1.

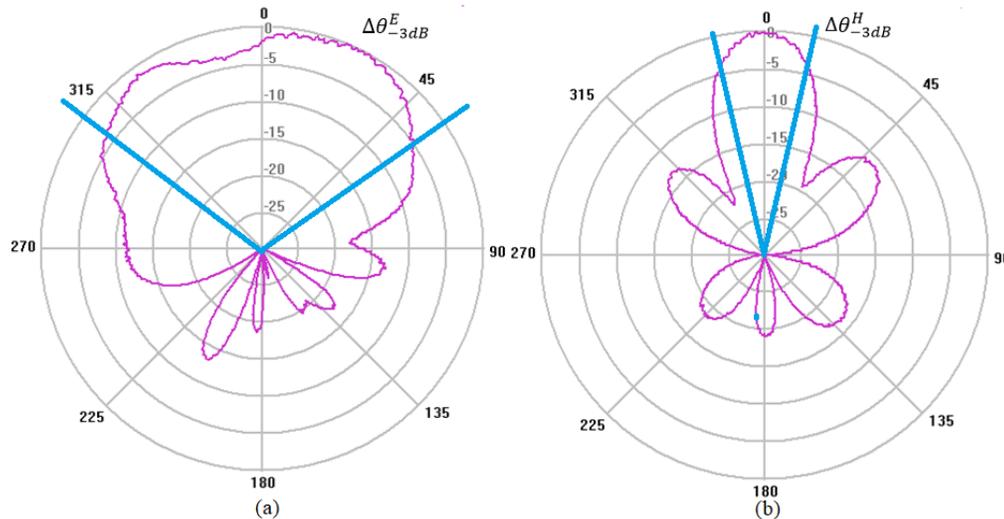


Figura 117. Diagrama de radiación Antena Dipolo Polarización Horizontal (a) y Vertical (b).

En el diagrama de radiación en polarización horizontal y vertical se mide el Ancho de haz de media potencia para proceder a calcular la Directividad de la siguiente manera:

$$\Delta\theta_{-3dB}^E = 110^\circ$$

$$\Delta\theta_{-3dB}^H = 28^\circ$$

$$D = \frac{4\pi}{\Delta\theta_{-3dB}^E * \Delta\theta_{-3dB}^H}$$

$$D = \frac{4\pi}{\frac{110 * \pi}{180} * \frac{28 * \pi}{180}}$$

$$D = 11.269dB = 13.393 \text{ adimensional}$$

En la **Tabla 32**, se presenta el porcentaje de erro entre los valores de directividad, obtenidos a partir del diagrama de radiación y los valores simulados.

Tabla 32.

Porcentaje de error de la Directividad Segunda Medición.

Continua →

Antena	Directividad Calculada		Directividad Simulada		Porcentaje de Error
	dB	Adimensional	dB	Adimensional	
Yagui-Uda	8.287	6.740	8,9	7,762	15,163
Dipolo	7.982	6.283	4,948	3,124	50,279
Patch	8.716	7.441	7,908	6,1773	16,983
Patch 2x1	11.269	13.393	8,721	7,447	44,396

Se observa que el valor del error se redujo considerablemente y las gráficas de los patrones de radiación, presentaron una mejor directividad y simetría con respecto al eje vertical, por lo que la reducción en las pérdidas de cables y conectores aumentando un amplificador en el transmisor resultó como una gran solución al problema que se presentó en las primeras mediciones.

Con los valores de directividad obtenidos se procede a calcular la eficiencia de cada antena con la **Ecuación (6)**, obteniendo los resultados mostrados en la **Tabla 33**.

$$G = \eta_r * D$$

Tabla 33.

Porcentaje de error de la Eficiencia

Antena	Directividad Medida		Ganancia Medida		Eficiencia Simulada	Eficiencia Medida	Porcentaje de Error
	dB	Adimensional	dB	Adimensional			
Yagui-Uda	10,133	10,313	7,208	5,258	85%	51%	40,16
Dipolo	10,679	11,693	2,577	1,81	52%	15%	69,97
Patch	11,998	15,842	3,564	2,272	45%	14%	68,27
Patch 2x1	18,038	63,66	7,709	5,9	92%	9%	89,96

Según los resultados obtenidos la antena Yagui-Uda presenta una mayor eficiencia, con respecto a las demás antenas, la eficiencia de cada antena resulta ser baja debido a que se presentó un error representativo en el parámetro de directividad, al no tener un diagrama de radiación en 100% confiable.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones.

Al realizar las mediciones de campo eléctrico con el equipo Narda NBM 550, se verificó que no existe fuga de campo eléctrico de la cámara anecoica, en ninguna de las tres paredes donde se realizó las pruebas, debido a que cuando el medidor se encontraba en la parte interior en la misma dirección a la cual apuntaba la antena, el nivel de campo eléctrico a una potencia de transmisión de 20[dBm], llegó a tomar valores de hasta 2 [V/m], mientras que, cuando el medidor se encontraba en la parte exterior de la cámara anecoica, de igual manera en la misma dirección en la que se encontraba apuntando la antena, se llegó a obtener un valor máximo de 0.2 [V/m].

Al realizar mediciones del patrón de radiación de una antena de prueba, se identificó que en la cámara anecoica se necesita realizar pequeños correcciones con el fin de obtener una gráfica aceptable del diagrama de radiación, por lo que se acondicionó unas planchas de material absorbente faltantes en la cámara anecoica, según se iba realizando las mediciones hasta llegar a verificar que tanto en polarización vertical y horizontal, se presente una simetría con respecto al eje vertical, además de una similitud con los diagramas obtenidos en la simulación. Razón por la cual se considera que la cámara se encuentra funcional para realizar mediciones de los parámetros de antenas.

Se verificó que la distancia de separación entre las antenas juega un papel fundamental al momento de realizar la medición del patrón de radiación, ya que se comprobó que la distancia óptima para realizar las mediciones es 1 metro, para cualquiera de las cuatro antenas de prueba que se utilizó, debido a que si se excede esta distancia aproximadamente a partir de los 1.3 metros, el

diagrama empieza a presentar disposiciones porque mide la radiación de zonas apartadas. A su vez, al tener una distancia menor a un metro el diagrama se distorsiona debido a que la antena capta la radiación de los campos reactivos de la misma.

El alineamiento entre las antenas de transmisión y recepción, cumple un papel importante al momento de realizar las mediciones, debido a que cuando las antenas no se encontraron bien alineadas, se presentó distorsiones en las gráficas del patrón radiación, el motivo de dichas distorsiones es que dentro de la cámara anecoica aparte del rayo directo que capta la antena de recepción existen varios rayos de reflexión provenientes de los diferentes rebotes del suelo, piso o paredes que de igual manera son captados en diferentes direcciones.

Se comprobó que para la obtención del parámetro ganancia de antena, la metodología de tres antenas es mejor que la metodología de dos antenas, al presentar una mejor aproximación al valor simulado adimensional, para la antena Yagui-Uda presenta una diferencia de 1 unidad, para la antena Dipolo existe una diferencia de 0.7 unidades, para la antena Patch se verifica que presenta una diferencia de 0.5 unidades y por último el Arreglo Patch presenta una diferencia de 1 unidad. A pesar de que el error se puede considerar alto, es mucho menor al error presentado al aplicar la metodología de dos antenas, por lo tanto, se considera que la ganancia obtenida a partir del método de tres antenas es una medición confiable.

A pesar de que ya se realizó los trabajos previos en la cámara anecoica para realizar la medición del diagrama de radiación, los primeros resultados de los diagramas no fueron los esperados, ya que no presentaron una simetría aceptable con respecto al eje vertical, además de presentar ciertas distorsiones, esto se debe a que se tiene un valor muy elevado de pérdidas de cables y conectores, por este motivo se realizó las mediciones del patrón de radiación aumentando un amplificador de 10 dB en el transmisor, para compensar dichas pérdidas obteniendo mejores resultados. Además,

se comprobó que al no tener una buena grafica del patrón de radiación, los parámetros que dependen de la misma como Directividad, Ancho de Haz, Eficiencia, presentan mayor valor de error en la medición.

6.2. Recomendaciones.

Antes de realizar las mediciones con los equipos presentes en el laboratorio es recomendable estudiar el funcionamiento y realizar las calibraciones necesarias, debido a que una mala manipulación de estos, puede generar resultados erróneos en las mediciones o en un peor caso se dañar los equipos de medición.

Al realizar una simulación utilizando el software CST Studio, es recomendable usar variables globales para representar los parámetros de simulación, como son largo, ancho, espesor del dieléctrico, frecuencia, etc, debido a que resulta más sencillo para el usuario después realizar una optimización de la simulación variando dichos parámetros.

Se recomienda realizar un correcto alineamiento de las antenas de transmisión y recepción dentro de la cámara anecoica debido a que, si no se encuentra correctamente alineadas las antenas, los diagramas de radiación presentan más un nivel mayor de distorsión.

Se recomienda realizar la compra de cables con menor longitud para realizar mediciones en la cámara debido a que las pérdidas presentes en los cables están alrededor de los 10 dB, y esto genera inconvenientes en los resultados de las mediciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anguera, J., & Pérez, A. (2008). *Teoría de antenas guía de estudio*. España.
- Balanis, C. A. (2005). *Antenna theory analysis and desing*. Canada: Assistant.
- Barrionuevo, D., & Gonzales, J. (2012). *Criterios generales para el diseño de cámaras anecoicas*. Córdoba.
- Brito Flores, P. P., & Lopez Campos, M. P. (2006). *Diseño y construcción de una cámara anecoica para la facultad de ingeniería electrónica*. Sangolqui.
- Cardama Aznar, A. (2002). *Antenas*. Barcelona.
- Dassault Systemes Cmpany. (2017). *CST studio suite 2017*.
- Equipment Test;. (s.f.). *Wave and antena training system [WATS-2002]*. Washington.
- Hsin-Chia, L., & Tah-Hsing, C. (1999). *Antenna gain and scattering measurement using reflective three-antenna method*. Taiwan.
- Kerns, D. M. (1970). *New method of gain measurement using two identical antennas, antenna radiation patterns, gain measurement*, 348,349.
- Manuel Huidobro, J. (2013). *Conceptos generales de antenas*. revista digital ACTA, 1-10.
- Medina Monroy, J. L., Díaz Tapia, E., Olvera Cervantes, J. L., Chávez Pérez, R. A., & Velázquez Ventura, A. (2008). *Análisis y comparación de metodologías para determinar experimentalmente la ganacia de antenas de RF y microondas*. Santiago de Querétano.
- Murillo Fuentes, J. J. (2005). *Radiación y radiocomunicación 4º ingeniería de telecomunicación*. Sevilla.
- Narda Safety Test Solutions . (2006). *NBM-550 Narda broadband field meter operating manual*. Alemania.

Niknejad. (s.f.). *Two port power gain*. California: University of California, Berkeley.

Shakhtour, H., Cornelius, R., & Heberling, D. (2013). *Three antenna gain determination method in compact antenna test ranges*. Loughborough.

Theory, A. (s.f.). *Antenna-theory.com*. Obtenido de <http://www.antenna-theory.com/spanish/antena.php>