

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **DISEÑO, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA MICROSTRIP YAGI PARA OPERAR EN LA BANDA DE 5.8 GHZ**

#### **PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**ANDREA LIZETH GORDÓN CORRALES**

**andrea.gordon@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: M.Sc. RICARDO XAVIER LLUGSI CAÑAR**

**ricardo.llugsi@epn.edu.ec**

**Quito, julio 2016**

## DECLARACIÓN

Yo, ANDREA LIZETH GORDÓN CORRALES, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**Andrea Lizeth Gordón Corrales**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por ANDREA LIZETH GORDÓN CORRALES, bajo mi supervisión.

---

**Ing. Ricardo Llugsi, MSc.**  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero agradecer a Dios y a la virgen Dolorosa por cada día de vida, por permitirme terminar este proyecto y por protegerme día a día con su bendición.

A mis padres por su ejemplo de perseverancia y lucha constante ante las adversidades de la vida.

A mis hermanos por su apoyo invaluable tanto en lo académico como en lo personal.

Al Ingeniero Ricardo Llugsí por su acertada dirección y palabras de motivación para culminar este estudio.

A los ingenieros que de una u otra manera me apoyaron en el desarrollo de mi tesis, al Ingeniero Mario Cevallos por su ayuda desinteresada, paz en su tumba.

**Andrea Gordón C.**

## **DEDICATORIA**

Esta tesis está dedicada principalmente a mi madre, una mujer de ejemplo, luchadora, alegre, quien tiene las palabras justas y oportunas cuando uno de sus hijos está decaído, gracias mami por darme la vida, por ser mi vida y por darme el aliento día a día.

A mi padre porque gracias a sus sacrificios y sus cuidados estoy culminando esta etapa de mi vida.

A mi hermana, mi alma gemela, mi compañera de peleas, que sería de mi sin tus consejos y alientos, gracias.

A mi hermano por cuidarme desde chiquita, gracias por todos los buenos momentos que los atesoro en el corazón.

A mis enanitos, Jenny, Santy, Nicolás y mi Vicky Nicky gracias por que con sus travesuras y locuras son un motivo más en mi vida para sonreír y formarme como persona por y para ustedes.

A mis abuelitos, gracias por ser ejemplo de vida y modelos a seguir.

Amigos gracias por su amistad, por ser un soporte en este caminar.

**Andrea Gordón C.**

## CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| CAPÍTULO I .....  | 1  |
| TEORÍA DE ANTENAS .....   | 1  |
| 1.1 INTRODUCCIÓN .....  | 1  |
| 1.2 ANTENAS .....   | 2  |
| 1.3 PARÁMETROS DE LA ANTENA .....   | 2  |
| 1.3.1 DIAGRAMA DE RADIACIÓN .....   | 2  |
| 1.3.1.1 Antenas Omnidireccionales .....   | 4  |
| 1.3.1.2 Antenas Direccionales .....   | 5  |
| 1.3.2 ANCHO DE BANDA .....  | 6  |
| 1.3.3 DIRECTIVIDAD .....  | 7  |
| 1.3.4 GANANCIA .....  | 10 |
| 1.3.5 POLARIZACIÓN .....  | 11 |
| 1.3.5.1 Polarización Lineal .....   | 11 |
| 1.3.5.2 Polarización Circular .....   | 12 |
| 1.3.5.3 Polarización Elíptica .....   | 12 |
| 1.3.6 IMPEDANCIA .....  | 13 |
| 1.3.7 VSWR ( <i>VOLTAGE STANDING WAVE RATIO</i> , RELACIÓN DE ONDA ESTACIONARIA DE VOLTAJE) ..... | 13 |
| 1.3.8 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN .....  | 14 |
| 1.3.9 PÉRDIDAS POR RETORNO .....  | 15 |
| 1.4 ANTENA YAGI .....   | 15 |
| 1.4.1 ELEMENTOS DE LA ANTENA YAGI .....   | 16 |
| 1.4.1.1 Reflector .....   | 16 |
| 1.4.1.2 Dipolo .....  | 16 |
| 1.4.1.3 Director .....  | 17 |
| 1.4.2 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE UNA ANTENA YAGI .....  | 18 |
| 1.5 TECNOLOGÍA MICROSTRIP .....   | 18 |
| 1.5.1 ANTENAS MICROSTRIP .....  | 18 |
| 1.5.2 TIPOS DE ONDAS EN ANTENAS MICROSTRIP .....  | 19 |
| 1.5.2.1 Ondas Espaciales .....  | 19 |
| 1.5.2.2 Ondas Guiadas .....   | 19 |
| 1.5.2.3 Ondas con Fugas .....   | 20 |

|   |    |
|---|----|
| 1.5.2.4 Ondas Superficiales .....   | 20 |
| 1.5.3 TÉCNICAS DE ALIMENTACIÓN MICROSTRIP .....   | 21 |
| 1.5.3.1 Línea Microstrip .....  | 21 |
| 1.5.3.2 Cable Coaxial .....   | 22 |
| 1.5.3.3 Ranura.....   | 23 |
| 1.5.3.4 Acoplamiento Electromagnético .....   | 23 |
| 1.6 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE DIAGRAMAS DE RADIACIÓN .....                                     | 24 |
| 1.6.1 CONDICIÓN DE CAMPO LEJANO .....   | 25 |
| 1.6.2 OATS ( <i>OPEN-AREA TEST SITES</i> , SITIOS DE PRUEBA DE ÁREA ABIERTA) .....          | 25 |
| 1.6.3 CÁMARAS ANECOICAS .....   | 26 |
| 1.6.4 CATR ( <i>COMPACT ANTENNA TEST RANGE</i> , PRUEBA DE ALCANCE DE ANTENA COMPACTA)..... | 28 |
| 1.6.5 CAMPO CERCANO.....  | 28 |
| 1.7 APLICACIONES EN LA BANDA DE 5.8 GHZ.....  | 29 |
| 1.7.1 REDES WBAN.....   | 30 |
| 1.7.1.1 Aplicaciones de las Redes WBAN.....   | 30 |
| 1.7.1.1.1 Aplicaciones Médicas.....   | 31 |
| 1.7.1.1.2 Aplicaciones No-médicas .....   | 32 |
| 1.7.2 CANALES DE COMUNICACIÓN.....  | 33 |
| 1.7.2.1 Canal off-body .....  | 33 |
| 1.7.2.2 Canal on-body .....   | 34 |
| 1.7.2.3 Canal in-body .....   | 34 |
| 1.7.2.4 Canal inter-body .....  | 34 |
| CAPÍTULO II .....   | 36 |
| DISEÑO ANALÍTICO DE LA ANTENA.....  | 36 |
| 2.1 SELECCIÓN DEL TIPO DE SUSTRATO.....   | 36 |
| 2.1.1 CÁLCULO DEL ELEMENTO CONDUCTOR .....  | 36 |
| 2.1.1.1 Cálculo del elemento radiante con el sustrato FR-4 .....                            | 38 |
| 2.1.1.2 Cálculo del elemento conductor con el sustrato RO4003c.....                         | 40 |
| 2.1.1.3 Cálculo del elemento conductor con el sustrato RO5880.....                          | 41 |
| 2.1.2 CÁLCULO DE IMPEDANCIA.....  | 43 |
| 2.1.2.1 Cálculo de la impedancia con el sustrato FR-4 .....                                 | 46 |

|   |    |
|---|----|
| 2.1.2.2 Cálculo de la impedancia con el sustrato RO4003c .....                                    | 47 |
| 2.1.2.3 Cálculo de la impedancia con el sustrato RO5880 .....                                     | 47 |
| 2.1.3 CÁLCULO DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN .....  | 48 |
| 2.1.3.1 Cálculo de la línea de alimentación con el sustrato FR-4 .....                            | 50 |
| 2.1.3.2 Cálculo de la línea de alimentación con el sustrato RO4003c.....                          | 51 |
| 2.1.3.3 Cálculo de la línea de alimentación con el sustrato RO5880.....                           | 52 |
| 2.2 DISEÑO MEDIANTE TABLAS .....  | 53 |
| 2.2.1 CÁLCULO DE ELEMENTOS PARÁSITOS .....  | 55 |
| 2.2.1.1 Antena de longitud $0.4\lambda$ .....   | 55 |
| 2.2.1.2 Antena de longitud $0.8\lambda$ .....   | 56 |
| 2.2.1.3 Antena de longitud $1.20\lambda$ .....  | 57 |
| 2.2.1.4 Antena de longitud $2.2\lambda$ .....   | 58 |
| 2.2.1.5 Antena de longitud $3.2\lambda$ .....   | 60 |
| 2.2.1.6 Antena de longitud $4.2\lambda$ .....   | 62 |
| 2.3 DISEÑO MEDIANTE UNA CALCULADORA YAGI .....  | 64 |
| 2.3.1 LONGITUD DE ONDA .....  | 64 |
| 2.3.2 LONGITUD DEL REFLECTOR.....   | 65 |
| 2.3.3 ESPACIAMIENTO DEL REFLECTOR.....  | 65 |
| 2.3.4 LONGITUD DEL DIRECTOR.....  | 65 |
| 2.3.5 ESPACIAMIENTO ENTRE DIRECTORES.....   | 67 |
| 2.3.6 GANANCIA .....  | 67 |
| CAPÍTULO III .....  | 71 |
| SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN .....   | 71 |
| 3.1 SELECCIÓN DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN .....  | 71 |
| 3.1.1 ADS ( <i>ADVANCED DESIGN SYSTEM</i> , SISTEMA DE DISEÑO AVANZADO).....                      | 71 |
| 3.1.2 CST ( <i>COMPUTER SIMULATION TECHNOLOGY</i> , TECNOLOGÍA DE SIMULACIÓN COMPUTARIZADA) ..... | 72 |
| 3.1.3 FEKO .....  | 73 |
| 3.2 SIMULACIÓN DEL ELEMENTO RADIANTE CON LOS TRES TIPOS DE SUSTRATO .....                         | 74 |
| 3.2.1 FR-4.....   | 74 |
| 3.2.2 RO4003c.....  | 77 |

|  |     |
|--|-----|
| 3.2.3 RO5880 .....   | 79  |
| 3.3 SIMULACIÓN DE LA ANTENA YAGI .....                                   | 81  |
| 3.3.1 MÉTODO POR TABLAS.....   | 82  |
| 3.3.1.1 Un elemento director .....                                       | 82  |
| 3.3.1.2 Dos elementos directores .....                                   | 84  |
| 3.3.1.3 Tres elementos directores .....                                  | 86  |
| 3.3.1.4 Cuatro elementos directores.....                                 | 88  |
| 3.3.2 MÉTODO POR CALCULADORA.....  | 93  |
| 3.3.2.1 Un elemento director .....                                       | 93  |
| 3.3.2.2 Dos elementos directores .....                                   | 95  |
| 3.3.2.3 Tres elementos directores .....                                  | 97  |
| 3.3.2.4 Cuatro elementos directores.....                                 | 100 |
| CAPÍTULO IV .....  | 106 |
| PRUEBAS Y RESULTADOS.....  | 106 |
| 4.1 MATERIALES: .....  | 106 |
| 4.1.1 RO4003C.....   | 106 |
| 4.1.2 RG316 .....  | 107 |
| 4.1.3 CONECTOR SMA.....  | 108 |
| 4.1.4 SEPARADORES DE PLACA.....  | 109 |
| 4.2 CONSTRUCCIÓN DE LA ANTENA .....                                      | 109 |
| 4.2.1 COSTO DE LA ANTENA .....   | 116 |
| 4.3 DESARROLLO DE PRUEBAS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS.....                | 117 |
| 4.4 PROBLEMAS QUE SE PRESENTAN EN EL DISEÑO A ALTAS<br>FRECUENCIAS ..... | 128 |
| 4.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE OPERAR A LA FRECUENCIA DE<br>5.8GHZ .....  | 129 |
| CAPÍTULO V .....   | 130 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....                                     | 130 |
| 5.1 CONCLUSIONES .....   | 130 |
| 5.2 RECOMENDACIONES .....  | 132 |
| Bibliografía .....   | 133 |
| ANEXO A. DATASHEET SUSTRATO FR4  |     |
| ANEXO B. DATASHEET SUSTRATO RO4003c                                      |     |

ANEXO C. DATASHEET SUSTRATO RT-5880

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. 1 Sistema del que forma parte la antena [3].....   | 2  |
| Figura 1. 2 Diagrama de Radiación de una antena Yagi en los planos E y H [2] ...                             | 3  |
| Figura 1. 3 Puntos de media potencia en el diagrama de radiación [5].....                                    | 3  |
| Figura 1. 4 Lóbulos de un Diagrama de Radiación [2] .....  | 4  |
| Figura 1. 5 Diagrama de radiación de una antena Omnidireccional en el plano<br>Horizontal [8].....           | 5  |
| Figura 1. 6 Diagrama de radiación de una antena Omnidireccional en el plano<br>Vertical [8] .....            | 5  |
| Figura 1. 7 Diagrama de radiación de una antena Direccional en los planos<br>Vertical y Horizontal [9] ..... | 6  |
| Figura 1. 8 Directividad de diferentes tipos de Antenas [10] .....   | 7  |
| Figura 1. 9 Ángulos que forma el lóbulo en los puntos de media potencia plano E y<br>H [2].....              | 9  |
| Figura 1. 10 Ganancia de la antena según la forma de radiar la energía [11].....                             | 10 |
| Figura 1. 11 Polarización Lineal [13] .....  | 12 |
| Figura 1. 12 Polarización Circular [13] .....  | 12 |
| Figura 1. 13 Polarización Elíptica [13].....   | 13 |
| Figura 1. 14 Estructura de una Antena Yagi-Uda [17].....   | 17 |
| Figura 1. 15 Diagrama de Radiación en 3D de una antena Yagi-Uda [18].....                                    | 18 |
| Figura 1. 16 Estructura Microstrip [19] .....  | 19 |
| Figura 1. 17 Onda Espacial [19].....   | 19 |
| Figura 1. 18 Onda Guiada [19].....   | 20 |
| Figura 1. 19 Onda con Fuga [19].....   | 20 |
| Figura 1. 20 Onda Superficial [19].....  | 21 |
| Figura 1. 21 Alimentación por Línea Microstrip [22] .....  | 22 |
| Figura 1. 22 Alimentación por Cable Coaxial [23] .....   | 22 |
| Figura 1. 23 Alimentación por Ranura [24].....   | 23 |
| Figura 1. 24 Alimentación por Acoplamiento Electromagnético [25] .....                                       | 24 |
| Figura 1. 25 Cámara Anecoica con antena de prueba [27].....  | 26 |
| Figura 1. 26 Tipos de Cámaras Anecoicas: a) Rectangular, b) Cónica [2].....                                  | 27 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. 27 Elementos Distribuidos dentro de la Cámara Anecoica por el método CATR [2]..... | 28 |
| Figura 1. 28 Campo Cercano: (a) Planares, (b) Cilíndrico y (c) Esférico [2].....             | 29 |
| Figura 1. 29 Clasificación de Redes WBAN .....   | 30 |
| Figura 1. 30 Diagrama de una red WBAN [30].....  | 31 |
| Figura 1. 31 Gráficas obtenidas de tejidos normales y cancerígenos [32] .....                | 32 |
| Figura 1. 32 Proceso de Autenticación de Huellas Dactilares [33] .....                       | 33 |

## **CAPÍTULO 2**

|   |    |
|---|----|
| Figura 2. 1 Diseño Elemento Radiante [36].....                            | 36 |
| Figura 2. 2 Circuito equivalente del modelo de línea de transmisión ..... | 43 |
| Figura 2. 3 Radiación entre slots del elemento radiante [2] .....         | 44 |
| Figura 2. 4 Alimentación por Inserciones [41] .....                       | 50 |

## **CAPÍTULO 3**

|  |    |
|--|----|
| Figura 3. 1 Espacio de Trabajo ADS [45] .....  | 72 |
| Figura 3. 2 Áreas de Aplicación de CST [38] .....  | 73 |
| Figura 3. 3 Espacio de Trabajo FEKO [47].....  | 74 |
| Figura 3. 4 Diseño del elemento conductor con el sustrato FR-4.....                            | 75 |
| Figura 3. 5 Impedancia de salida a 5.8 Ghz con el sustrato FR-4.....                           | 75 |
| Figura 3. 6 Frecuencia de resonancia de la antena, 5.8 GHz .....                               | 75 |
| Figura 3. 7 Relación de acoplamiento de la antena con el medio de transmisión                  | 76 |
| Figura 3. 8 Ganancia del elemento conductor con el sustrato FR-4.....                          | 76 |
| Figura 3. 9 Directividad del elemento conductor con el sustrato FR-4 .....                     | 76 |
| Figura 3. 10 Diseño del elemento conductor con el sustrato RO4003c.....                        | 77 |
| Figura 3. 11 Impedancia de salida de la antena.....  | 77 |
| Figura 3. 12 Frecuencia de resonancia con el sustrato RO4003c.....                             | 77 |
| Figura 3. 13 Relación de acoplamiento con la impedancia de entrada .....                       | 78 |
| Figura 3. 14 Ganancia de la antena a la frecuencia de 5.8 GHz en el sustrato RO4003c .....     | 78 |
| Figura 3. 15 Directividad de la antena a la frecuencia de 5.8 GHz en el sustrato RO4003c ..... | 78 |
| Figura 3. 16 Diseño del elemento conductor con el sustrato RO5880 .....                        | 79 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3. 17 Impedancia a la salida de la antena.....   | 79 |
| Figura 3. 18 Frecuencia de resonancia con el sustrato RO5880.....                                 | 79 |
| Figura 3. 19 Relación de acoplamiento con la impedancia de entrada .....                          | 80 |
| Figura 3. 20 Ganancia de la antena a la frecuencia de 5.8 GHz en el sustrato<br>RO5880.....       | 80 |
| Figura 3. 21 Directividad de la antena a la frecuencia de 5.8 GHz en el sustrato<br>RO5880.....   | 80 |
| Figura 3. 22 Antena Yagi con un director .....  | 82 |
| Figura 3. 23 Parámetros S con un elemento director .....  | 82 |
| Figura 3. 24 Impedancia característica a la frecuencia de 5.8 GHz .....                           | 83 |
| Figura 3. 25 VSWR a la frecuencia de 5.8 GHz .....  | 83 |
| Figura 3. 26 Ganancia de la antena con un director a 5.8 GHz.....                                 | 84 |
| Figura 3. 27 Directividad de la antena con un director a 5.8 GHz .....                            | 84 |
| Figura 3. 28 Antena Yagi con dos directores.....  | 84 |
| Figura 3. 29 Parámetros S con dos elementos directores.....                                       | 85 |
| Figura 3. 30 Impedancia característica a la frecuencia de 5.8 GHz .....                           | 85 |
| Figura 3. 31 VSWR a la frecuencia de 5.8 GHz .....  | 85 |
| Figura 3. 32 Ganancia de la antena con dos directores a 5.8 GHz.....                              | 86 |
| Figura 3. 33 Directividad de la antena con dos directores a 5.8 GHz.....                          | 86 |
| Figura 3. 34 Antena Yagi con tres directores .....  | 86 |
| Figura 3. 35 Parámetros S con tres elementos directores .....                                     | 87 |
| Figura 3. 36 Impedancia característica a la frecuencia de 5.8 GHz .....                           | 87 |
| Figura 3. 37 VSWR a la frecuencia de 5.8 GHz .....  | 87 |
| Figura 3. 38 Ganancia de la antena con tres directores a 5.8 GHz.....                             | 88 |
| Figura 3. 39 Directividad de la antena con tres directores a 5.8 GHz .....                        | 88 |
| Figura 3. 40 Antena Yagi con cuatro directores .....  | 88 |
| Figura 3. 41 Parámetros S con cuatro elementos directores .....                                   | 89 |
| Figura 3. 42 Impedancia característica a la frecuencia de 5.8 GHz .....                           | 89 |
| Figura 3. 43 VSWR a la frecuencia de 5.8 GHz .....  | 89 |
| Figura 3. 44 Ganancia de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz.....                           | 90 |
| Figura 3. 45 Ganancia de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz en<br>coordenadas polares..... | 90 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 3. 46 Ganancia de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz en coordenadas cartesianas .....     | 90  |
| Figura 3. 47 Directividad de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz plano horizontal.....            | 91  |
| Figura 3. 48 Directividad de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz plano vertical.....              | 91  |
| Figura 3. 49 Directividad de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz en coordenadas polares.....      | 91  |
| Figura 3. 50 Directividad de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz en coordenadas cartesianas ..... | 92  |
| Figura 3. 51 Antena Yagi con un director.....   | 93  |
| Figura 3. 52 Parámetros S con un elemento director.....   | 93  |
| Figura 3. 53 Impedancia característica a la frecuencia de 5.8 GHz .....                                 | 94  |
| Figura 3. 54 VSWR a la frecuencia de 5.8 GHz .....  | 94  |
| Figura 3. 55 Ganancia de la antena con un director a 5.8 GHz.....                                       | 95  |
| Figura 3. 56 Directividad de la antena con un director a 5.8 GHz .....                                  | 95  |
| Figura 3. 57 Antena Yagi con dos directores.....  | 95  |
| Figura 3. 58 Parámetros S con dos elementos directores.....   | 96  |
| Figura 3. 59 Impedancia característica a la frecuencia de 5.8 GHz .....                                 | 96  |
| Figura 3. 60 VSWR a la frecuencia de 5.8 GHz .....  | 96  |
| Figura 3. 61 Ganancia de la antena con dos directores a 5.8 GHz.....                                    | 97  |
| Figura 3. 62 Directividad de la antena con dos directores a 5.8 GHz.....                                | 97  |
| Figura 3. 63 Antena Yagi con tres directores .....  | 97  |
| Figura 3. 64 Parámetros S con tres elementos directores .....   | 98  |
| Figura 3. 65 Impedancia característica a la frecuencia de 5.8 GHz .....                                 | 98  |
| Figura 3. 66 VSWR a la frecuencia de 5.8 GHz .....  | 99  |
| Figura 3. 67 Ganancia de la antena con tres directores a 5.8 GHz.....                                   | 99  |
| Figura 3. 68 Directividad de la antena con tres directores a 5.8 GHz .....                              | 99  |
| Figura 3. 69 Antena Yagi con cuatro directores .....  | 100 |
| Figura 3. 70 Parámetros S con cuatro elementos directores .....   | 100 |
| Figura 3. 71 Impedancia característica a la frecuencia de 5.8 GHz .....                                 | 101 |
| Figura 3. 72 VSWR a la frecuencia de 5.8 GHz .....  | 101 |
| Figura 3. 73 Ganancia de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz.....                                 | 102 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 3. 74 Ganancia de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz en coordenadas polares.....          | 102 |
| Figura 3. 75 Ganancia de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz en coordenadas cartesianas .....     | 102 |
| Figura 3. 76 Directividad de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz plano horizontal.....            | 103 |
| Figura 3. 77 Directividad de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz plano vertical.....              | 103 |
| Figura 3. 78 Directividad de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz en coordenadas polares.....      | 104 |
| Figura 3. 79 Directividad de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz en coordenadas cartesianas ..... | 104 |

#### **CAPÍTULO 4**

|  |     |
|--|-----|
| Figura 4. 1 Desempaquetado de la Placa RO4003c .....                                       | 106 |
| Figura 4. 2 Cable coaxial RG316 .....  | 107 |
| Figura 4. 3 Atenuación de tipos de cable Coaxial en función a la frecuencia [50] .....     | 108 |
| Figura 4. 4 Conector SMA hembra y macho .....  | 108 |
| Figura 4. 5 Separadores Plásticos .....  | 109 |
| Figura 4. 6 Diseño de la Antena en Autocad.....  | 109 |
| Figura 4. 7 Diseño del Reflector .....   | 110 |
| Figura 4. 8 Diseño del primer director .....   | 110 |
| Figura 4. 9 Diseño del segundo, tercer y cuarto director.....                              | 111 |
| Figura 4. 10 Baquelita con los elementos diseñados .....                                   | 111 |
| Figura 4. 11 Distribución de los elementos conductores respecto al elemento conductor..... | 112 |
| Figura 4. 12 Separación entre elementos .....  | 112 |
| Figura 4. 13 Distancia del primer elemento director respecto a la base de la antena .....  | 113 |
| Figura 4. 14 Distancia del segundo elemento director respecto a la base de la antena ..... | 113 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 4. 15 Distancia del tercer elemento director respecto a la base de la antena .....  | 113 |
| Figura 4. 16 Distancia del cuarto elemento director y del reflector respecto a la base de la antena.....   | 114 |
| Figura 4. 17 Diseño en Autocad de perforaciones para separaciones.....   | 114 |
| Figura 4. 18 Acoplamiento de placas respecto a separaciones y distancia respecto a la antena base.....   | 115 |
| Figura 4. 19 Elementos de la antena antes de ser armada.....   | 115 |
| Figura 4. 20 Antena Yagi.....  | 116 |
| Figura 4. 21 Analizador de espectros Aaronia HF-60105.....   | 117 |
| Figura 4. 22 Antena Yagi sujeta al soporte en la plataforma giratoria .....  | 118 |
| Figura 4. 23 Puesta a prueba en la Cámara Anecoica.....  | 119 |
| Figura 4. 24 Diagrama de Radiación en el Plano horizontal de la Antena Yagi con los elementos directores ubicados uno más arriba que otro .....                | 119 |
| Figura 4. 25 Diagrama de Radiación en el Plano vertical de la Antena Yagi con los elementos directores ubicados uno más arriba que otro.....                   | 120 |
| Figura 4. 26 Diagrama de radiación en el plano Horizontal en los puntos de media potencia.....   | 120 |
| Figura 4. 27 Diagrama de radiación en el plano Vertical en los puntos de media potencia.....   | 121 |
| Figura 4. 28 Antena con directores dispuestos a la misma altura .....  | 122 |
| Figura 4. 29 Diagrama de Radiación en el Plano horizontal de la Antena Yagi con los elementos directores ubicados en la misma posición respecto a un plano ..  | 122 |
| Figura 4. 30 Diagrama de Radiación en el Plano vertical de la Antena Yagi con los elementos directores ubicados en la misma posición respecto a un plano ..... | 123 |
| Figura 4. 31 Diagrama de Radiación de la antena Yagi con los directores a la misma altura en el plano horizontal.....  | 123 |
| Figura 4. 32 Diagrama de Radiación de la antena Yagi con los directores a la misma altura en el plano vertical.....  | 124 |
| Figura 4. 33 Método de calibración de equipo [54].....   | 124 |
| Figura 4. 34 Antena de prueba conectada al Analizador Vectorial.....   | 125 |
| Figura 4. 35 VSWR a la frecuencia de 5.8 GHz .....   | 126 |
| Figura 4. 36 Impedancia de la antena a la frecuencia de 5.8 GHz.....   | 126 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 4. 37 Parámetros S .....         | 127 |
| Figura 4. 38 Pérdidas por Retorno ..... | 127 |

## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO 1

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. 1 Relación entre impedancia normalizada, VSWR y coeficiente de reflexión [3]..... | 15 |
| Tabla 1. 2 Bandas de Frecuencias de Reden WBAN [35].....                                   | 35 |

### CAPÍTULO 2

|  |    |
|--|----|
| Tabla 2. 1 Características del sustrato FR-4 [38] .....  | 38 |
| Tabla 2. 2 Características del sustrato RO4003c [38] .....   | 40 |
| Tabla 2. 3 Características del sustrato RO5880 [38].....   | 41 |
| Tabla 2. 4 Dimensionamiento de los elementos de una antena Yagi [42].....                              | 54 |
| Tabla 2. 5 Espaciamiento entre elementos Directores [43] .....   | 67 |
| Tabla 2. 6 Valores de Ganancia obtenidos mediante el método de ecuaciones de una calculadora Yagi..... | 70 |

### CAPÍTULO 3

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 3. 1 Tabla comparativa de los parámetros de los diferentes sustratos.....  | 81  |
| Tabla 3. 2 Parámetros medidos al aumentar el número de directores por método de tablas.....  | 92  |
| Tabla 3. 3 Parámetros medidos al aumentar el número de directores por método de calculadora .....                                      | 104 |
| Tabla 3. 4 Reajuste de valores de diseño del elemento conductor en base al diseño teórico y pruebas en el software de simulación ..... | 105 |

### CAPÍTULO 4

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 4. 1 Costo de la antena microstrip Yagi.....                         | 116 |
| Tabla 4. 2 Tabla de Referencia entre Pérdidas por retorno y VSWR [3] ..... | 128 |

| <b>SIMBOLOGÍA</b> |  |
|-------------------|--|
| $v$               | Velocidad de la luz en el medio                        |
| $c$               | Velocidad de la luz en el vacío                        |
| $f$               | Frecuencia de operación                                |
| $\lambda$         | Longitud de Onda                                       |
| $BW$              | Ancho de Banda   |
| $f_{max}$         | Frecuencia Superior                                    |
| $f_{min}$         | Frecuencia Inferior                                    |
| $f_o$             | Frecuencia Central                                     |
| $G$               | Ganancia   |
| $n$               | Número de elementos                                    |
| $h$               | Altura del sustrato                                    |
| $l$               | Longitud de la línea microstrip                        |
| $w$               | Ancho de la línea microstrip                           |
| $t$               | Altura de la línea microstrip                          |
| $W$               | Ancho del elemento conductor                           |
| $\epsilon_r$      | Constante dieléctrica                                  |
| $\epsilon_{reff}$ | Constante dieléctrica efectiva                         |
| $\Delta L$        | Variación de longitud del elemento conductor           |
| $L_{eff}$         | Longitud efectiva del parche                           |
| $L$               | Longitud del parche                                    |
| $Y$               | Admitancia   |
| $G$               | Conductancia   |
| $B$               | Susceptancia   |
| $R_{in}$          | Resistencia de entrada al circuito                     |
| $G_{12}$          | Conductancia Mutua                                     |
| $J_0$             | Función de Bessel de orden cero y primera clase        |
| $Z_o$             | Impedancia de la antena                                |
| $y_0$             | Profundidad de la inserción                            |
| $W_o$             | Ancho de la línea de transmisión                       |
| $L_{Ta}$          | Longitud de la línea de transmisión                    |
| $L_{antena}$      | Longitud de la antena considerando elementos parásitos |
| $l_{reflector}$   | Longitud del elemento reflector                        |
| $l_{n\ director}$ | Longitud del n elemento director                       |

| <b>ABREVIATURAS</b> |  |
|---------------------|--|
| IEEE                | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos |
| VSWR                | <i>Voltage Standing Wave Ratio</i> , Relación de Onda Estacionaria de Voltaje                                |
| dBi                 | Unidades logarítmicas con respecto a un radiador isotrópico  |
| dB                  | Unidades logarítmicas con respecto a un dipolo estándar  |
| mm                  | Milímetros   |
| OATS                | <i>Open-Area Test Sites</i> , Sitios de Prueba de Área Abierta   |
| CATR                | <i>Compact Antenna Test Range</i> , Prueba de Alcance de Antena Compacta                                     |
| HF                  | <i>High Frequency</i> , Alta Frecuencia  |
| VHF                 | <i>Very High Frequency</i> , Muy Alta Frecuencia   |
| UHF                 | <i>Ultra High Frequency</i> , Ultra Alta Frecuencia  |
| Gb/s                | Gigabits por segundo   |
| WBAN                | <i>Wireless Body Area Network</i> , Redes de Área Corporal Inalámbrica                                       |
| PHz                 | Penta Hertzios   |
| PAN                 | <i>Personal Area Network</i> , Red de Área Personal  |
| WBAN                | <i>Wireless Body Area Network</i> , Redes de Área Corporal Inalámbrica                                       |
| MICS                | <i>Medical Implanted Communication Services</i> , Servicios de Comunicación para Implantes Médicos           |
| ISM                 | <i>Industrial Scientific and Medical</i> , Industrial, Científica y Médica                                   |
| UWB                 | UWB, <i>Ultra Wide Band</i> , Banda Ultra Ancha  |
| ADS                 | <i>Advanced Design System</i> , Sistema de Diseño Avanzado   |
| CST                 | <i>Computer Simulation Technology</i> , Tecnología en Simulación Computarizada                               |

## RESUMEN

La creciente demanda de velocidad para nuevas aplicaciones en redes inalámbricas, que requieren una muy alta eficiencia, ha llevado al desarrollo de nuevas tecnologías y por lo tanto a la generación de nuevos grupos de estudio enfocados en la frecuencia de 5.8 GHz, las bandas de frecuencia ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), son un rango dentro del cual se desarrollan aplicaciones tecnológicas, industriales y medicina.

En el presente proyecto se revisarán las principales características, importancia y aplicaciones que se obtienen al operar a altas frecuencias, en bandas de frecuencia no licenciadas de 5.8 GHz, en un estudio que permita identificar ventajas y desventajas de la misma.

Considerando la orientación del patrón de radiación, existen dos tipos de antenas: se encuentran omnidireccionales y direccionales, la diferencia entre las dos radica en que la primera irradia energía en todas las direcciones y el segundo tipo de antena irradia en una sola dirección.

Las antenas Yagi son antenas direccionales que permiten una concentración de energía en una dirección determinada, los elementos parásitos que conforman la antena permiten aumentar la directividad y por ende la ganancia, a estos elementos se les conoce como elementos directores, y el elemento reflector permite que la energía que se transmite en la parte posterior de la antena sea reflejada hacia el frente.

En este trabajo se llevará a cabo el diseño de una antena Yagi microstrip, para lo cual se analizarán dos técnicas: tablas de diseño y ecuaciones matemáticas obtenidas de una calculadora Yagi.

Las antenas microstrip son compactos, de poco peso y de bajo costo, la elección del material es primordial, se debe verificar que opere satisfactoriamente en la frecuencia de diseño, en este caso 5.8 GHz.

Se elegirán los materiales más adecuados para la construcción de la antena en base al método seleccionado, posteriormente se procederá a realizar pruebas con equipos pertenecientes a la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la

Escuela Politécnica Nacional para determinar los parámetros de la antena como la directividad, impedancia, VSWR y pérdidas por retorno.

## PRESENTACIÓN

En el presente proyecto “DISEÑO, SIMULACIÓN Y CONTRUCCIÓN DE UNA ANTENA YAGI MICROSTRIP EN LA BANDA DE 5.8 GHZ” se presentan los resultados obtenidos del diseño de una antena Yagi microstrip en base a dos métodos de diseño: tablas de diseño y ecuaciones matemáticas obtenidas de una calculadora Yagi, los resultados se obtienen de simulaciones y pruebas de laboratorio. Adicionalmente se realizará un análisis del diagrama de radiación de la antena a fin de determinar la directividad y ganancia de la misma, y se comparará dicho análisis con los resultados que se obtuvieron en la simulación.

En este trabajo se establecen cinco capítulos los mismos que se detallan a continuación:

En el Capítulo 1, se realizará un breve estudio sobre la antena y sus parámetros, además se analizará la tecnología microstrip y los métodos de alimentación, finalmente se establecerá un análisis de la tecnología que opera a la frecuencia de 5.8 GHz y las aplicaciones en la banda de frecuencia mencionada.

En el capítulo 2, se realizará el diseño de una antena Yagi microstrip, inicialmente se diseñará el elemento radiante para tres tipos de sustrato, este diseño será en base a fórmulas matemáticas existentes para diseños en la tecnología microstrip, el diseño de los elementos parásitos se realizará con dos métodos de diseño.

En el Capítulo 3, se seleccionará el software más apropiado que permita determinar el sustrato con mejores resultados, y obtener los parámetros de la antena a simular, así como los lóbulos de radiación que mostrarán cuan efectiva es la antena en cuanto a directividad y ganancia.

En el Capítulo 4, se procederá a la construcción de la antena en base al capítulo anterior, además que se realizará una breve descripción de los materiales a ser empleados en la elaboración de la misma, posteriormente se realizarán pruebas con el Analizador Vectorial perteneciente al Laboratorio de Alta Frecuencia que permitirá determinar los parámetros de la antena como el VSWR, pérdidas por retorno y la impedancia de la antena.

Para determinar la directividad de la antena se realizarán pruebas en una cámara anecoica que se encuentra en el Laboratorio de Antenas, en donde se medirán valores de potencia emitidos por la antena de prueba hacia una antena receptora; los laboratorios antes mencionados pertenecen a la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional.

Finalmente en el Capítulo 5, se presentarán las conclusiones que se obtuvieron durante el desarrollo del proyecto y además se emitirán recomendaciones para el desarrollo de proyectos futuros.

# CAPÍTULO I

## TEORÍA DE ANTENAS

### 1.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se realizará un estudio de conceptos sobre antenas, características, clases y parámetros que definen a una antena por ejemplo directividad, impedancia de entrada, ganancia, ancho de banda, diagramas de radiación entre otras. Los diagramas de radiación permiten tener una noción de la potencia en determinada dirección que irradia y el área de radiación de la antena.

El tipo de antena se elige de acuerdo a las necesidades que demandan los escenarios de trabajo, por ejemplo si existe línea de vista o si se tienen obstáculos, condiciones del clima, conectores, u otros factores que inciden en las pérdidas durante la transmisión. Adicionalmente será decisión del diseñador de la red si se incorporan amplificadores o repetidores para compensar las pérdidas en el caso de ser estas considerables.

De acuerdo a los requerimientos de diseño, que se planteará más adelante, se hará una revisión de antenas directivas y antenas con tecnología microstrip, para combinar características y compensar, con las ventajas de una, las carencias de otra.

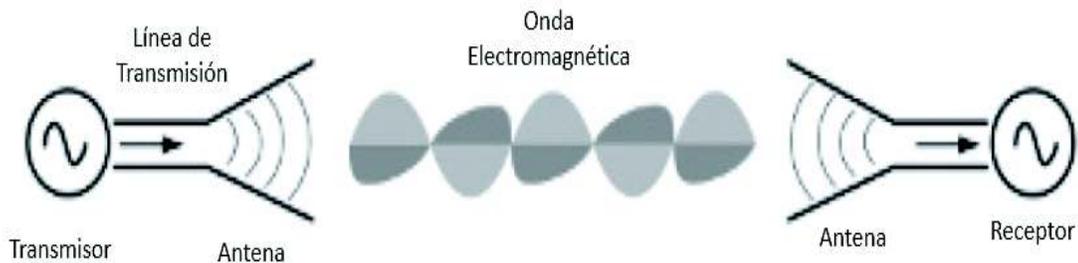
Se abordarán también temas relacionados a antenas operando a altas frecuencias, su evolución en la tecnología y como han ido entrando en el mundo de la medicina, siendo este campo un tema de estudio de gran importancia en el futuro, debido a que se ha encontrado que se obtienen mejores resultados en comparación con la tecnología médica que se usa actualmente.

En este capítulo se desarrollan conceptos necesarios sobre la tecnología microstrip, por ejemplo tipos de antenas microstrip y técnicas de alimentación para un mejor entendimiento de los temas a tratarse más adelante.

## 1.2 ANTENAS

El IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*, Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) propone la siguiente definición: “Una antena es una parte de un sistema transmisor o receptor diseñada para radiar o recibir ondas electromagnéticas” [1], en la figura 1.1 se observa el sistema en el que interviene una antena.

Una onda electromagnética se forma por campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo entre conductores, está asociadas con cargas y corrientes eléctricas, la onda viaja a través de la línea de transmisión y entra a la antena [2].



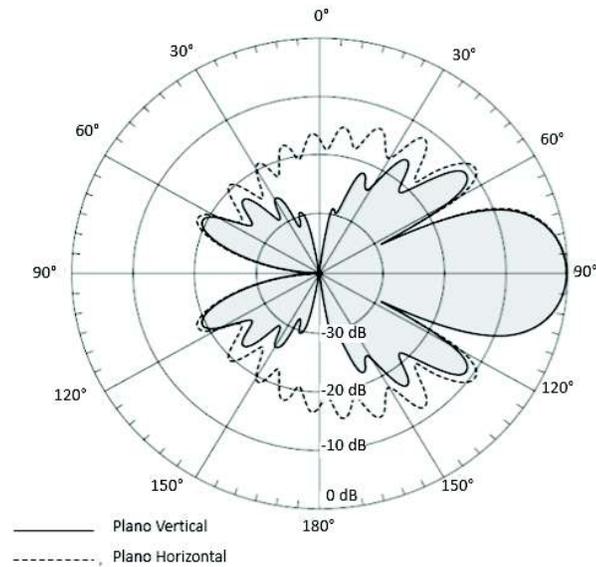
**Figura 1. 1** Sistema del que forma parte la antena [3]

## 1.3 PARÁMETROS DE LA ANTENA

Para evaluar el comportamiento de una antena dentro del sistema, se consideran varios parámetros que la definen como el diagrama de radiación, ancho de banda, directividad, ganancia, polarización, impedancia, VSWR, coeficiente de reflexión y pérdidas por retorno.

### 1.3.1 DIAGRAMA DE RADIACIÓN

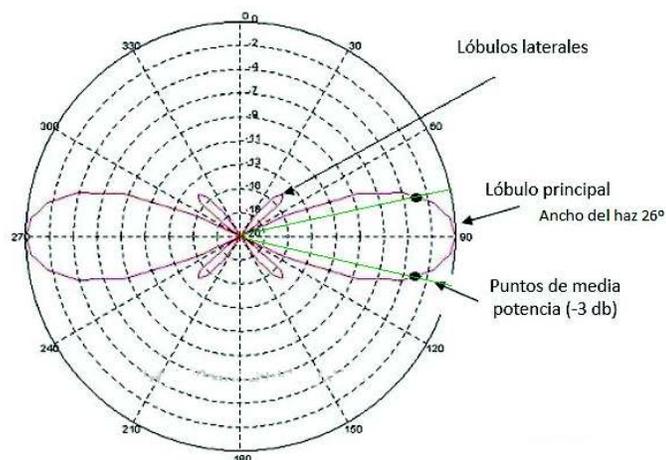
Es una gráfica que representa la distribución espacial de la energía radiada por la antena, es necesario considerar que la forma de radiación depende de su geometría y de sus dimensiones, por lo que su energía se orienta en determinadas direcciones, que pueden ser representadas en gráficas 2D (2 planos) como se muestra en la Figura 1.2 y en 3D (3 planos).



**Figura 1. 2** Diagrama de Radiación de una antena Yagi en los planos E y H [2]

De forma general los diagramas de radiación muestran la potencia radiada por la antena, esta representación está dada en una escala de decibeles<sup>1</sup>.

Además el diagrama de radiación permite el cálculo del ancho del haz, este se calcula tomando en cuenta la diferencia angular en el que la radiación disminuye en un valor de 3 dB desde la máxima potencia [4], la medida de -3 dB se conoce también como puntos de media potencia, en la Figura 1.3 se observa lo anteriormente mencionado.

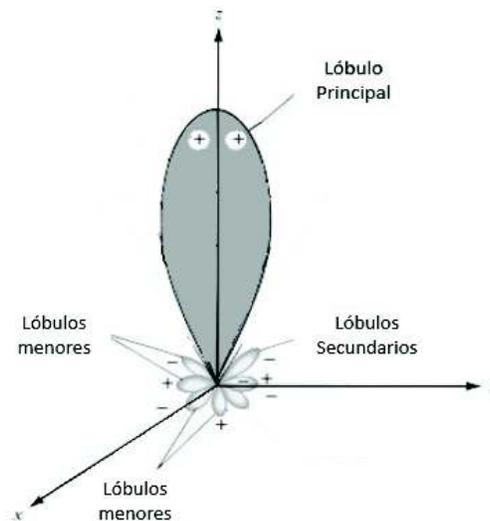


**Figura 1. 3** Puntos de media potencia en el diagrama de radiación [5]

<sup>1</sup> Unidad logarítmica utilizada para medir la atenuación o ganancia de un sistema.

Un lóbulo de radiación corresponde a una parte del diagrama limitada por regiones de menor radiación, en un diagrama se puede encontrar lóbulo principal y secundario; el lóbulo principal es la zona con radiación máxima y el lóbulo secundario es el lóbulo lateral de mayor amplitud, cabe señalar que puede haber varios lóbulos laterales que son zonas que rodean al lóbulo principal y que son de menor amplitud [6]. En la Figura 1.4 se observan los tipos de lóbulos que se pueden encontrar en un diagrama de radiación, los signos junto a los lóbulos indican la polarización relativa de amplitud entre varios lóbulos.

Existen antenas de diferentes tipos: omnidireccionales y direccionales, los lóbulos de radiación varían de acuerdo al tipo de antena que se esté utilizando.



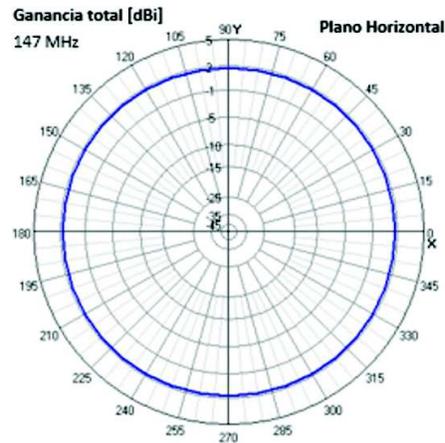
**Figura 1. 4** Lóbulos de un Diagrama de Radiación [2]

### 1.3.1.1 Antenas Omnidireccionales

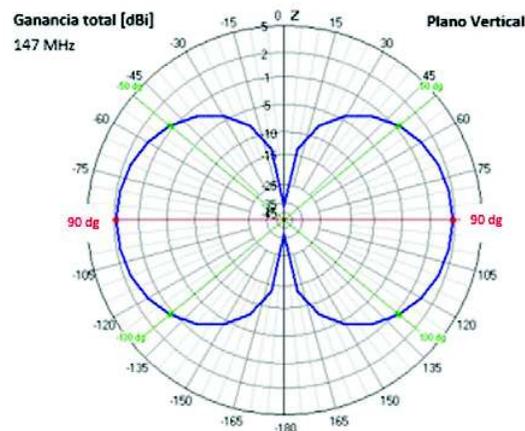
Son antenas con un dipolo simple, que cubren en su totalidad 360 grados en el plano horizontal, con un diagrama de radiación circular constante [7].

Debido a su cobertura total, este tipo de antenas son usadas en estaciones base para telefonía celular que requieren abarcar todas las direcciones, algunos tipos de antenas omnidireccionales tienen baja ganancia, por lo que se suelen utilizar arreglos de dipolos para aumentar la ganancia.

Las Figuras 1.5 y 1.6 muestran los diagramas de radiación de una antena Omnidireccional en el plano horizontal y vertical respectivamente.



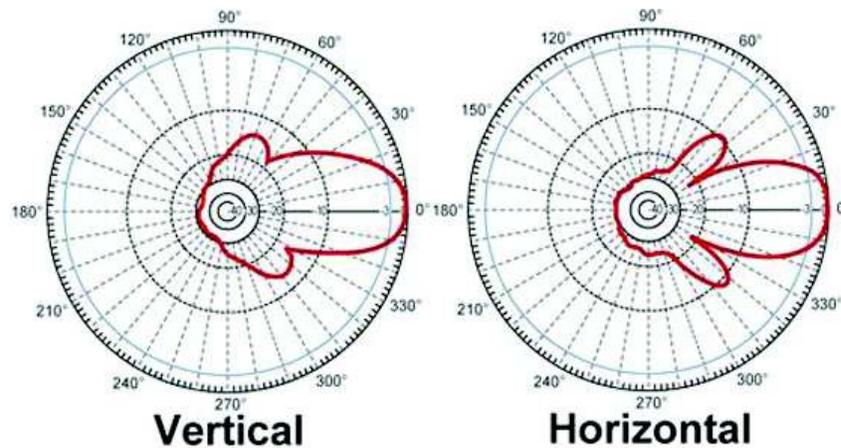
**Figura 1. 5** Diagrama de radiación de una antena Omnidireccional en el plano Horizontal [8]



**Figura 1. 6** Diagrama de radiación de una antena Omnidireccional en el plano Vertical [8]

### 1.3.1.2 Antenas Direccionales

Este tipo de antenas permite concentrar su campo de radiación a una dirección específica. El diagrama de radiación para el plano vertical y horizontal de una antena direccional se indica en la Figura 1.7. En el mismo se ve claramente como el lóbulo de radiación está concentrado en una sola dirección.



**Figura 1. 7** Diagrama de radiación de una antena Direccional en los planos Vertical y Horizontal [9]

Este tipo de antenas son utilizadas cuando se quiere dar cobertura a una dirección en particular, debido a su direccionalidad pueden ser usadas para unir puntos a largas distancias.

### 1.3.2 ANCHO DE BANDA

Se define como ancho de banda de una antena al rango de frecuencias dentro de las cuales opera recibiendo o radiando energía, fuera de este rango los niveles de reactancia se incrementan y no se tendría un funcionamiento adecuado.

El ancho de banda se define mediante la ecuación (1.1):

$$BW = f_{max} - f_{min} \quad (1.1)$$

Donde:

$BW$  = Ancho de Banda

$f_{max}$  = Frecuencia Superior

$f_{min}$  = Frecuencia Inferior

Se considera como frecuencia central a la frecuencia de resonancia de la antena, partiendo de este concepto, se dice que el ancho de banda puede ser considerado como el rango de frecuencias, en el que la frecuencia central se encuentra en la mitad del rango, donde las características de antena como por ejemplo impedancia

de entrada, ganancia, polarización, están dentro de un valor aceptable de la frecuencia central [3].

### 1.3.3 DIRECTIVIDAD

El parámetro de directividad se refiere a la relación de la densidad de potencia radiada a una dirección por unidad de ángulo sólido y a una distancia, con respecto a la densidad de potencia de una antena isotrópica considerada a la misma distancia y con la misma potencia. La directividad es adimensional y puede ser expresada en unidades logarítmicas dBi.

Se dice que una antena tiene directividad cero cuando irradia igual en todas las direcciones, este es el caso de las antenas omnidireccionales.

Al decir que una antena es directiva se refiere a que puede concentrar su potencia en una determinada dirección, la antena Yagi es considerada como una antena directiva.

A manera de ejemplo se puede decir que las antenas satelitales presentan un alto nivel de directividad pues reciben señales de lugares específicos, en cambio las antenas que se usan en las comunicaciones celulares tienen una directividad baja, ya que en este caso se recibe señales de todas las direcciones, 360°.

Las antenas satelitales pueden ser, parabólicas inclusive Yagi, en la Figura 1.8 se observa los diagramas de radiación de las antenas dipolo, Yagi y parabólica.



**Figura 1. 8** Directividad de diferentes tipos de Antenas [10]

Matemáticamente la Directividad se expresa en la ecuación (1.2) [2]:

$$D = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (1.2)$$

Donde:

D = Directividad

U = Intensidad de Radiación

$P_{rad}$  = Potencia total radiada

Al tener la antena componentes de polarización en el plano horizontal y vertical, la directividad total es la suma de la directividad parcial de las dos polarizaciones, plano horizontal y vertical:

$$U = \frac{1}{2\eta} [|E_{\theta}(\theta, \phi)|^2 + |E_{\phi}(\theta, \phi)|^2] \quad (1.3)$$

Donde:

$E_{\theta}$  y  $E_{\phi}$  = Componentes del Campo eléctrico

$\eta$  = Impedancia intrínseca del medio

La potencia de radiación total se define en la ecuación (1.4) [2] descrita a continuación:

$$P_{rad} = \iint_{\Omega} U(\theta, \phi) d\Omega = B_0 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta, \phi) \sin \theta \, d\theta \, d\phi \quad (1.4)$$

Donde:

$B_0$  = Constante

$F(\theta, \phi)$  = Potencia radiada en una dirección

Partiendo de la ecuación (1.2) se tiene que:

$$D = 4\pi \frac{F(\theta, \phi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\theta, \phi) \sin \theta \, d\theta \, d\phi} \quad (1.5)$$

La ecuación (1.5) se puede escribir también de la siguiente manera:

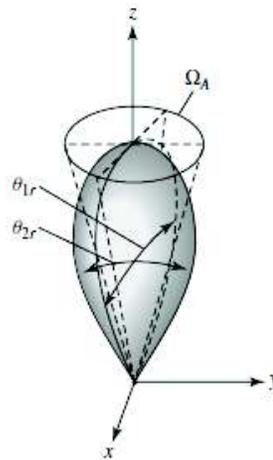
$$D = \frac{4\pi}{\frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin \theta \, d\theta \, d\phi}{F(\theta, \phi)}} \approx \frac{4\pi}{\Omega_A} \quad (1.6)$$

Donde:

$\Omega_A$  = Ángulo sólido del lóbulo de radiación

$\Omega_A$  se define como el ángulo sólido por el cual toda la potencia de la antena fluiría, si la intensidad de radiación fuese constante [2].

En las antenas direccionales que tienen un lóbulo de radiación principal y lóbulos secundarios de tamaño pequeño, como es el caso de la antena Yagi, el valor de la directividad es aproximadamente igual al producto de los ángulos en los puntos de media potencia (-3dB) de dos planos perpendiculares como se muestra en la Figura 1.9 [2]- [3].



**Figura 1. 9** Ángulos que forma el lóbulo en los puntos de media potencia plano E y H [2]

La directividad a partir de los ángulos que forman el lóbulo en los puntos de media potencia de los planos horizontal y vertical se expresa en la ecuación (1.7) [3]:

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A} = \frac{4\pi}{\theta_{1r} \cdot \theta_{2r}} \quad (1.7)$$

Donde:

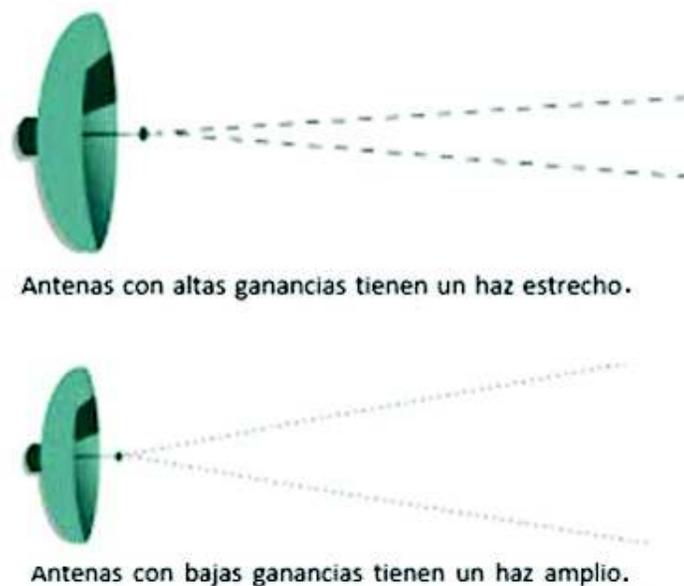
$\theta_{1r}, \theta_{2r}$  = ángulos del lóbulo de radiación en radianes de los puntos de media potencia de los planos vertical y horizontal.

### 1.3.4 GANANCIA

Se define a la ganancia como a la relación que existe entre la densidad de potencia entregada a la antena en una dirección con respecto a la densidad de potencia radiada por una antena isotrópica, que es la potencia de entrada aceptada por la antena [2].

Si bien es cierto la definición de directividad y de ganancia son similares, difieren en el hecho que la directividad se fundamenta en la comparación de la potencia radiada y la ganancia de la potencia que es entregada a la antena.

La relación que existe entre la potencia en los terminales de la antena y la potencia radiada determina la eficiencia de la antena.



**Figura 1. 10** Ganancia de la antena según la forma de radiar la energía [11]

La ganancia de la antena es proporcional a la directividad, a mayor directividad mayor ganancia. En la Figura 1.10, en el primer caso la ganancia es elevada debido a que la energía es dirigida con un ancho de haz menor, en el segundo caso en cambio la energía es transmitida de manera más amplia, por lo que la ganancia es baja [11].

La ecuación (1.8) [2] muestra la relación entre ganancia y directividad y en la ecuación (1.9) [2] se muestra la relación de eficiencia.

$$G = \eta D \quad (1.8)$$

Donde:

G = Ganancia

D = Directividad

$\eta$  = Eficiencia de la antena

$$\eta = \frac{P_t}{P_{in}} \quad (1.9)$$

Donde:

$P_t$  = Potencia Total radiada

$P_{in}$  = Potencia ingresada a la antena

Al ser una antena microstrip la eficiencia de la antena es muy alta, cercana a 1, por lo que se considera que el valor de la ganancia es aproximadamente igual al valor de la directividad como se muestra en la ecuación (1.10):

$$G \cong D \quad (1.10)$$

### 1.3.5 POLARIZACIÓN

La propiedad de una onda electromagnética que describe la variación en el tiempo de la dirección y magnitud relativa del vector de campo eléctrico se denomina polarización de una onda radiada [2].

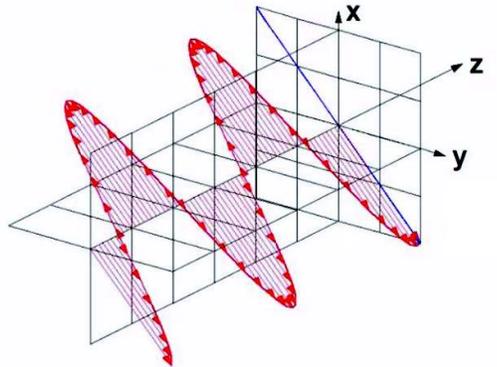
La polarización de una antena en una dirección es la polarización de la onda radiada por la antena, es decir es la curva trazada por el punto final de la flecha del vector que representa el campo eléctrico instantáneo [2].

Se tienen tres tipos de polarización: lineal, circular y elíptica.

#### 1.3.5.1 Polarización Lineal

La polarización lineal se produce cuando el campo eléctrico de una onda electromagnética ocurre solo en un plano que contiene la dirección de propagación, como se muestra en la Figura 1.11 el campo eléctrico tiene componentes en ambos ejes, que varían sinusoidalmente con el tiempo y en fase [12]. En otras palabras la

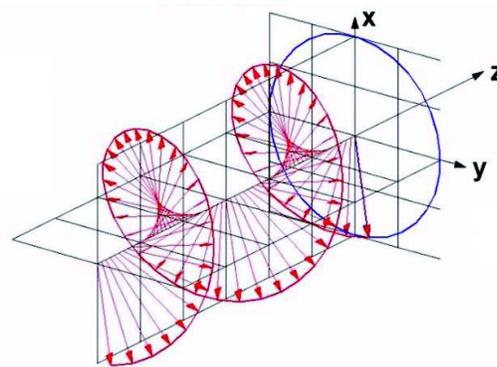
polarización es lineal cuando las componentes del campo eléctrico (ortogonales) son iguales o varían en fase  $n\pi$  radianes.



**Figura 1. 11** Polarización Lineal [13]

### 1.3.5.2 Polarización Circular

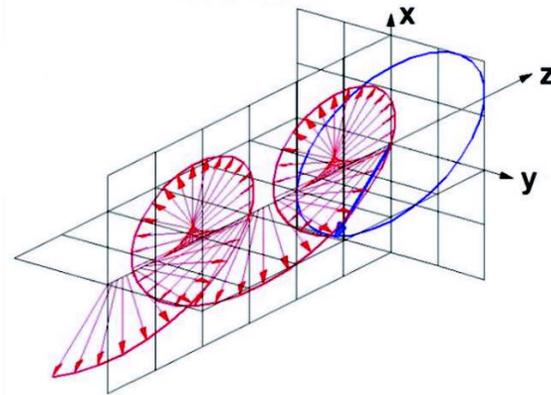
A diferencia de la polarización lineal la polarización circular se produce cuando las amplitudes de las componentes del campo eléctrico son iguales y sus fases varían en  $\pi/2$  o  $3\pi/2$  radianes como se ve en la Figura 1.12.



**Figura 1. 12** Polarización Circular [13]

### 1.3.5.3 Polarización Elíptica

Una polarización elíptica se presenta cuando la onda gira en el transcurso del tiempo por el espacio, es decir se produce un caso diferente a la polarización lineal y circular, las amplitudes son distintas y los ángulos no están en fase ni contrafase.



**Figura 1. 13** Polarización Elíptica [13]

Según el sentido de giro del campo, estas pueden ser polarización elíptica de derecha o de izquierda esto también sucede en el caso de la polarización circular. Como se observa en la Figura 1.13; es de derecha cuando el vector de campo eléctrico gira en el sentido de las manecillas del reloj y es de izquierda cuando gira en sentido anti horario.

### 1.3.6 IMPEDANCIA

La impedancia es la relación entre voltaje y corriente, es una cantidad compleja expresada en ohms ( $\Omega$ ) formada por dos componentes: una parte real denominada resistencia y una parte imaginaria conocida como reactancia [14], si solo se tiene una componente real se tiene una antena resonante.

La resonancia eléctrica se produce cuando en un circuito existen elementos reactivos que al pasar corriente alterna a una determinada frecuencia la reactancia se anula.

Una antena resonante tiene una impedancia resistiva como punto de alimentación y su componente imaginaria es cero o casi cero.

### 1.3.7 VSWR (*VOLTAGE STANDING WAVE RATIO*, RELACIÓN DE ONDA ESTACIONARIA DE VOLTAJE)

El parámetro de relación de onda estacionaria (ROE) o mejor conocido como *Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)* permite determinar qué tan bueno es el acoplamiento de la línea de transmisión con la carga.

Matemáticamente se expresa en la ecuación (1.11) [3]:

$$VSWR = \frac{|V|_{max}}{|V|_{min}} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (1.11)$$

Donde:

$VSWR$  = Relación de Onda Estacionaria

$|V|_{max}$  = Voltaje máximo en la línea de transmisión

$|V|_{min}$  = Voltaje mínimo en la línea de transmisión

$\Gamma$  = Coeficiente de Reflexión

Se tienen tres casos especiales de  $VSWR$  que son:

1. Terminales acoplados, cuando la impedancia de la línea de transmisión es igual a la impedancia de la carga.

$$Z_L = Z_o \Rightarrow VSWR = 1$$

2. Circuito Abierto

$$Z_L = \infty \Rightarrow VSWR = \infty$$

3. Corto Circuito

$$Z_L = 0 \Rightarrow VSWR = \infty$$

Existe un acoplamiento perfecto cuando el valor de  $VSWR$  es igual a 1, sin embargo se considera un buen acoplamiento cuando el valor de  $VSWR$  es menor a 2 [3].

### 1.3.8 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN

El coeficiente de reflexión es el parámetro que describe cuanto la onda electromagnética es reflejada, por medio del  $VSWR$  se puede calcular el coeficiente de reflexión, determinado por la ecuación (1.12) [3]:

$$|\Gamma| = \frac{VSWR-1}{VSWR+1} \quad (1.12)$$

El coeficiente de reflexión es cero cuando no existe onda reflejada, cuando el acoplamiento entre la línea de transmisión y la carga es 1, en cambio al existir onda

reflejada y de valor 1 significa que no existe un acoplamiento entre línea de transmisión y carga, es decir se tiene un circuito abierto [3].

En la tabla 1.1 se observa la relación entre los parámetros de impedancia normalizada, VSWR y coeficiente de reflexión.

**Tabla 1. 1** Relación entre impedancia normalizada, VSWR y coeficiente de reflexión [3]

| $Z_L/Z_o$ | VSWR     | $\Gamma$ |
|-----------|----------|----------|
| $\infty$  | $\infty$ | +1       |
| 1         | 1        | 0        |
| 0         | $\infty$ | -1       |

### 1.3.9 PÉRDIDAS POR RETORNO

Las pérdidas por retorno es una medida logarítmica expresada en dB, que indica la eficacia de la entrega de potencia mediante una línea de transmisión a la antena [15], es decir es la porción de potencia que no pudo ser absorbida por la línea de transmisión. La ecuación (1.13) expresa las pérdidas por retorno.

$$L_{RT} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{in}}{P_{ref}} \right) \quad (1.13)$$

Donde:

$L_{RT}$  = Pérdidas por Retorno

$P_{in}$  = Potencia de entrada

$P_{ref}$  = Potencia reflejada

## 1.4 ANTENA YAGI

La antena Yagi-Uda creada en 1926 por Shintaro Uda y por Hidetsugu Yagi, de ahí su nombre, es una antena direccional, consiste en tres diferentes elementos, conductor, reflector y director; estos elementos mejoran las propiedades de radiación cuando la antena está bien alineada [3].

El elemento reflector y director son considerados elementos parásitos porque no son conectados a la línea de transmisión y reciben energía por inducción mutua.

Este tipo de antena es empleada en aplicaciones en las bandas de HF (*High Frequency*, Alta Frecuencia), VHF (*Very High Frequency*, Muy Alta Frecuencia) y UHF (*Ultra High Frequency*, Ultra Alta Frecuencia), como televisión, radioenlaces punto a punto entre otros.

Al ser una antena direccional irradia mayor potencia en una determinada dirección disminuyendo la interferencia proveniente de otras antenas [16].

La antena se caracteriza por:

- Alto Rendimiento
- Estructura Simple
- Ganancia Elevada
- Bajo Costo

#### **1.4.1 ELEMENTOS DE LA ANTENA YAGI**

Los elementos que conforman la antena son 3: reflector, dipolo y directores, el objetivo de los mismos es concentrar su potencia en una determinada dirección y el aumento de la directividad de la antena.

##### **1.4.1.1 Reflector**

Es un elemento pasivo que disminuye la intensidad de la señal que está en su dirección y aumenta la intensidad en su dirección opuesta, se posiciona atrás del dipolo en dirección opuesta a la máxima radiación y es de mayor tamaño que el dipolo con respecto a la longitud de onda en la que opera, varía en un rango de  $[0.5 - 0.52]\lambda$ .

##### **1.4.1.2 Dipolo**

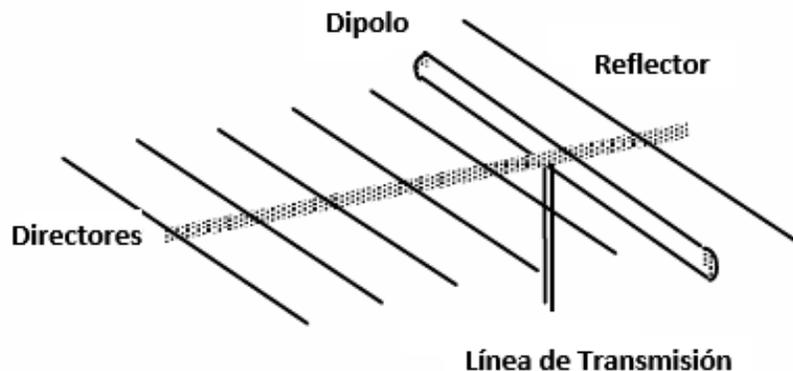
El dipolo o también llamado elemento activo se conecta directamente a la línea de transmisión, recibe potencia de la fuente.

### 1.4.1.3 Director

El director es un elemento pasivo, dirige la potencia emitida por el dipolo hacia adelante, es de menor longitud que el elemento radiante, se ubica al frente del dipolo.

Tanto el reflector como el o los directores al ser elementos pasivos no están conectados a la línea de transmisión, reciben energía por inducción mutua.

En la Figura 1.14 se observa la configuración habitual de una antena Yagi-Uda, el dipolo o elemento activo es un elemento resonante que permite aumentar el ancho de banda, la longitud de los directores está entre  $[0.38 - 0.48]\lambda$ , aproximadamente un 5% menor al tamaño del dipolo. La separación entre los directores es de  $0.11\lambda$  y para el reflector es de  $0.15\lambda$  aproximadamente [6].



**Figura 1. 14** Estructura de una Antena Yagi-Uda [17]

Como se mencionó anteriormente un parámetro que caracteriza a la antena es su alto nivel de ganancia entre 5 a 18 dBs, factor que depende de la cantidad de elementos que conforman la antena con un máximo de 20.

Para determinar la ganancia aproximada se utiliza en la ecuación (1.14):

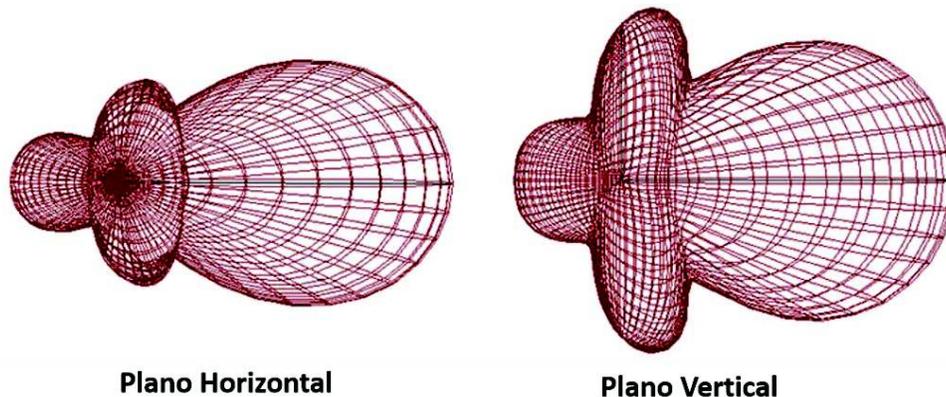
$$G \approx 10 \log n \quad (1.14)$$

Donde:

$n$  = Número de elementos

### 1.4.2 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE UNA ANTENA YAGI

Al ser la antena Yagi-Uda una antena direccional concentra su potencia en una sola dirección como podemos observar en la Figura 1.15, la directividad y la ganancia pueden incrementar su valor al aumentar el número de elementos directores.



**Figura 1. 15** Diagrama de Radiación en 3D de una antena Yagi-Uda [18]

## 1.5 TECNOLOGÍA MICROSTRIP

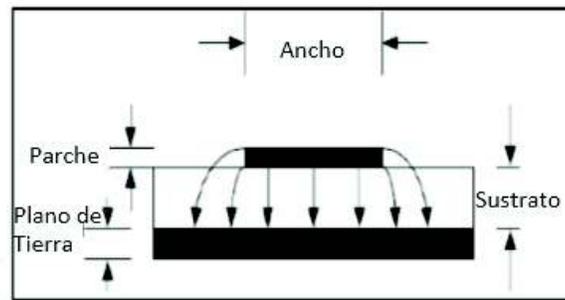
La tecnología microstrip permite realizar dispositivos cada vez más pequeños, de poco peso, de fácil adaptación con otros circuitos y de bajo costo. Las antenas con esta tecnología son muy usadas en aplicaciones para dispositivos inalámbricos.

Las desventajas que presentan las antenas tipo microstrip son ancho de banda estrecho, baja potencia y ganancia, pérdidas y afecciones por el calor, pérdida óhmica en grandes redes de alimentación [19].

Pérdida óhmica es la potencia que se disipa en la línea de transmisión por el efecto resistivo.

### 1.5.1 ANTENAS MICROSTRIP

Un dispositivo microstrip está formado por capas conductoras paralelas metálicas separadas por una lámina delgada aislante de sustrato dieléctrico de baja pérdida; una de las capas conductoras funciona como un plano de tierra, y la otra capa puede ser un parche resonante circular o rectangular o un dipolo resonante en donde se plasman los patrones de la antena, este tipo de estructura está representada en la Figura 1.16 [20]- [19].



**Figura 1. 16** Estructura Microstrip [19]

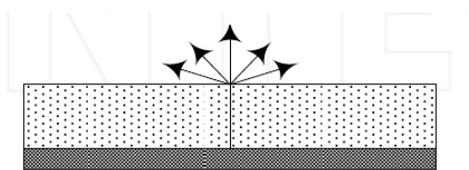
Se han realizado estudios para combinar las características de una antena direccional como la antena Yagi-Uda y la tecnología microstrip, valiéndose de las características de cada tipo de antena y compensando las debilidades de cada una. Una de las ventajas que presenta esta combinación de antenas es el aumento de ganancia, directividad y diseño compacto.

## 1.5.2 TIPOS DE ONDAS EN ANTENAS MICROSTRIP

Las ondas en una antena microstrip, según la dirección en la cual se transmiten, se clasifican en cuatro tipos:

### 1.5.2.1 Ondas Espaciales

Son ondas que se envían hacia arriba, con ángulos de elevación de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  en el espacio libre, como se muestra en la Figura 1.17, las amplitudes de las ondas van disminuyendo al aumentar la distancia. En líneas de transmisión este tipo de ondas son indeseables ya que producen radiación espuria, sin embargo contribuyen directamente a la eficiencia de radiación de la antena [19].

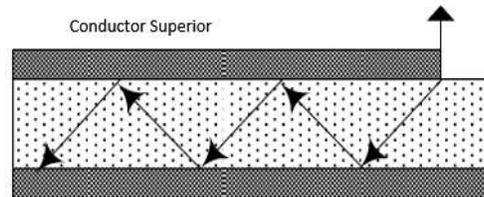


**Figura 1. 17** Onda Espacial [19]

### 1.5.2.2 Ondas Guiadas

Las ondas guiadas son ondas que viajan entre conductores superior e inferior y existen a valores específicos del ángulo de incidencia, las ondas rebotan entre la

capa metálica y la capa referente a tierra, esta explicación se muestra más claramente en la Figura 1.18. Este tipo de ondas no son óptimas para antenas tipo parche [19].

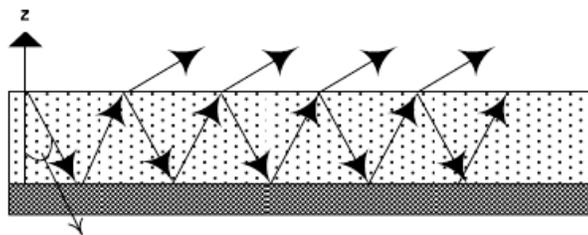


**Figura 1. 18** Onda Guiada [19]

### 1.5.2.3 Ondas con Fugas

Este tipo de ondas son llamadas de Fuga debido a que cuando la onda en un inicio se refleja bruscamente en el plano de tierra, una parte de la onda sale fuera del sustrato y la otra es reflejada una vez más, por lo que se dice que una parte de la onda se fuga del sustrato, como se indica en la Figura 1.19.

Las ondas con fugas se dirigen hacia el plano de tierra con un ángulo comprendido entre  $\pi - \sinh^{-1} 1/\sqrt{\epsilon_r}$  y  $\pi/2$  [19].

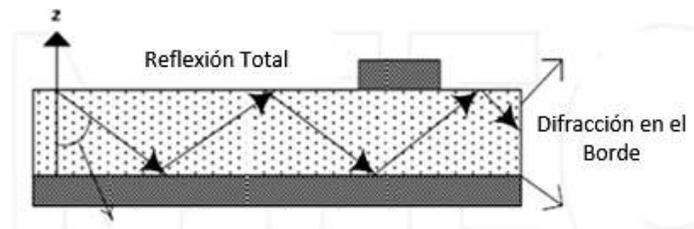


**Figura 1. 19** Onda con Fuga [19]

### 1.5.2.4 Ondas Superficiales

Las ondas superficiales son ondas que descienden ligeramente al plano de tierra, no uniformes, localizadas dentro del material dieléctrico, cuyo ángulo de elevación está comprendido entre  $\pi/2$  y  $\pi - \sin^{-1} 1/\sqrt{\epsilon_r}$ , entre los elementos conductores se produce una reflexión total [19], como se observa en la Figura 1.20.

Este tipo de ondas toman una parte de la energía de la señal reduciendo la eficiencia de la antena.



**Figura 1. 20** Onda Superficial [19]

Las pérdidas en una antena microstrip se tienen por varios motivos: por ejemplo debido al conductor, dieléctrico y por excitación en ondas superficiales. Se presentan pérdidas insignificantes cuando los elementos de la antena son extremadamente pequeños.

Las pérdidas por conductores varían en el rango de 0.15dB a 0.2 dB por longitud de onda, las pérdidas debidas al dieléctrico están en el rango de 0.04dB a 0.05dB por longitud de onda, estos valores aplican para una línea de transmisión de  $50 \Omega$  [21].

### 1.5.3 TÉCNICAS DE ALIMENTACIÓN MICROSTRIP

La alimentación en la antena parche es fundamental en el diseño, debido a que si la misma no es adecuada por más que el diseño del elemento conductor de la antena este perfecto la antena no funciona de manera adecuada.

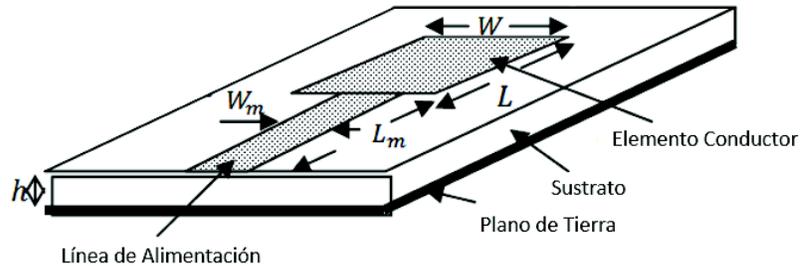
Se tiene 4 métodos de alimentación:

- Línea microstrip.
- Cable coaxial.
- Ranura.
- Acoplamiento Electromagnético.

#### 1.5.3.1 Línea Microstrip

La alimentación por línea microstrip consiste en una banda conductora delgada, como se muestra en la Figura 1.21, esta banda se encuentra en contacto de forma directa entre la línea de alimentación y el elemento conductor.

A medida que aumenta el grosor del sustrato también se incrementa la alimentación por radiación espuria<sup>2</sup> y las ondas superficiales [2].



**Figura 1. 21** Alimentación por Línea Microstrip [22]

Donde:

$h$  = Altura del sustrato

$L_m$  = Longitud de la línea microstrip

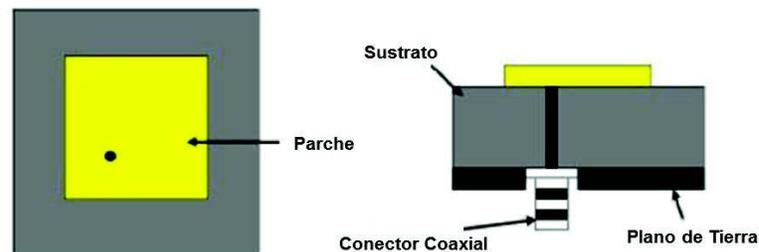
$W_m$  = Ancho de la línea microstrip

$W$  = Ancho de la antena parche

$L$  = Longitud de la antena parche

### 1.5.3.2 Cable Coaxial

El conductor interior del cable coaxial está unido al conductor del parche y el conductor externo está conectado a tierra, este tipo de método de alimentación es difícil de modelar pero fácil de construir además de tener baja radiación espuria, este tipo de alimentación se observa en la Figura 1.22 [2].



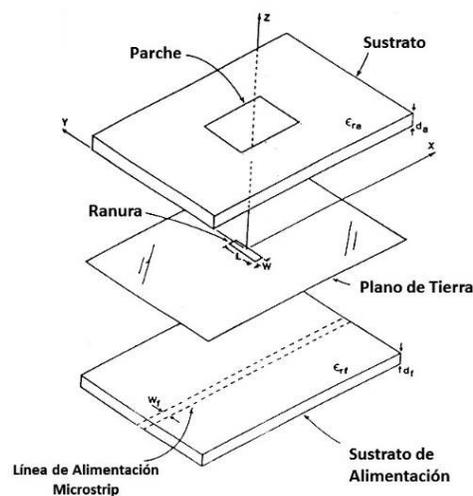
**Figura 1. 22** Alimentación por Cable Coaxial [23]

<sup>2</sup> Emisión de un transmisor a frecuencias fuera de la banda de frecuencia.

### 1.5.3.3 Ranura

Este tipo de alimentación microstrip es la más complicada de elaborar y posee un ancho de banda estrecho y radiación espuria moderada [2].

La alimentación por ranura consta de dos sustratos que se encuentran separados por un plano de tierra, el primer sustrato contiene el elemento conductor, a continuación el plano de tierra en el que se encuentra una ranura y finalmente en el segundo sustrato se halla la línea de alimentación microstrip que energiza el parche sobrepasando la ranura del plano de tierra como se muestra en la Figura 1.23, lo que le permite ser independiente del mecanismo de alimentación y del elemento radiante [2].

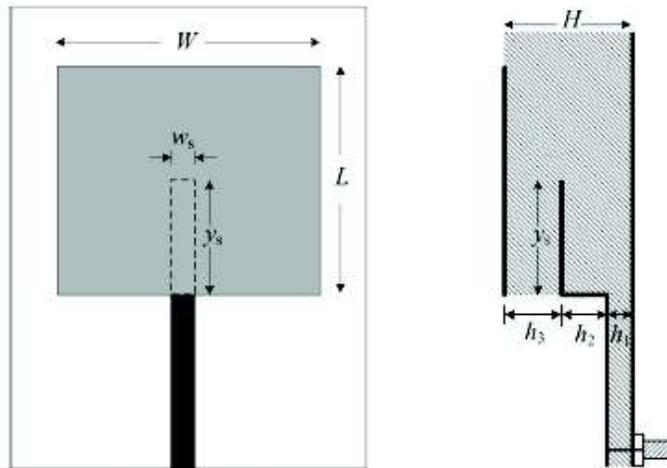


**Figura 1. 23** Alimentación por Ranura [24]

### 1.5.3.4 Acoplamiento Electromagnético

La alimentación por acoplamiento electromagnético posee el ancho de banda más grande de los métodos anteriormente descritos, es sencillo de modelar y además tiene baja radiación espuria [2].

Consiste en un sustrato conectado a tierra en el que se encuentra la línea de alimentación microstrip, sobre este se posiciona otro sustrato en el que se diseña el parche en la superficie, la distribución de los sustratos se indica en la Figura 1.24.



**Figura 1. 24** Alimentación por Acoplamiento Electromagnético [25]

Donde:

$w_s$  = Ancho de la línea microstrip

$y_s$  = Longitud de la línea microstrip

A diferencia del método de alimentación por ranura este no posee un plano de tierra que separe a los dieléctricos [26].

El parche es energizado electromagnéticamente mediante un acoplamiento capacitivo algo opuesto a lo que ocurre con los métodos de alimentación directos que se desarrollan por acoplamiento inductivo.

## 1.6 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE DIAGRAMAS DE RADIACIÓN

Los diagramas de radiación son representaciones de amplitud o fase de los campos que irradia la antena, el diagrama de radiación se presenta en varias formas, coordenadas polares en función de los ángulos  $\theta$  y  $\Phi$ , y en coordenadas cartesianas.

Un patrón de la antena es una representación de las características de radiación del elemento radiante en función de los ángulos  $\theta$  y  $\Phi$  para una distancia radial constante y frecuencia [2].

Existen dos métodos de medición de diagramas de radiación que dependen del tamaño y localización de la antena: campo cercano y lejano o dominio de la frecuencia y dominio del tiempo.

### 1.6.1 CONDICIÓN DE CAMPO LEJANO

Este método se encuentra definido principalmente por la distancia que separa la antena de prueba de la antena que va a generar el campo lejano, de modo que la variación de fase del frente de onda a través de la apertura de la antena de prueba sea menor a  $\pi/8$  radianes [3].

### 1.6.2 OATS (*OPEN-AREA TEST SITES, SITIOS DE PRUEBA DE ÁREA ABIERTA*)

Son lugares a campo abierto que no presentan reflexiones, la ventaja de este método de medición es su bajo costo, la desventaja es que los resultados dependen de la condición climática, además que el sitio en el que las pruebas van a ser desarrolladas debe ser uno en el cual las interferencias de RF (radiofrecuencia) sean bajas [3].

Puede ser que la señal sea directa de la antena transmisora a la antena receptora, o que sea reflejada de la antena transmisora a tierra y de tierra a la antena receptora.

La diferencia entre los caminos de las ondas directas y reflejadas se expresa en la ecuación (1.15) [3]:

$$\Delta = \left( \sqrt{l^2 + (h_T + h_R)^2} - \sqrt{l^2 + (h_T - h_R)^2} \right) \quad (1.15)$$

Donde:

$\Delta$  = Diferencia entre ondas directas y ondas reflejadas

$l$  = Distancia entre la antena transmisora y receptora

$h_T$  = Altura de la antena transmisora respecto a tierra

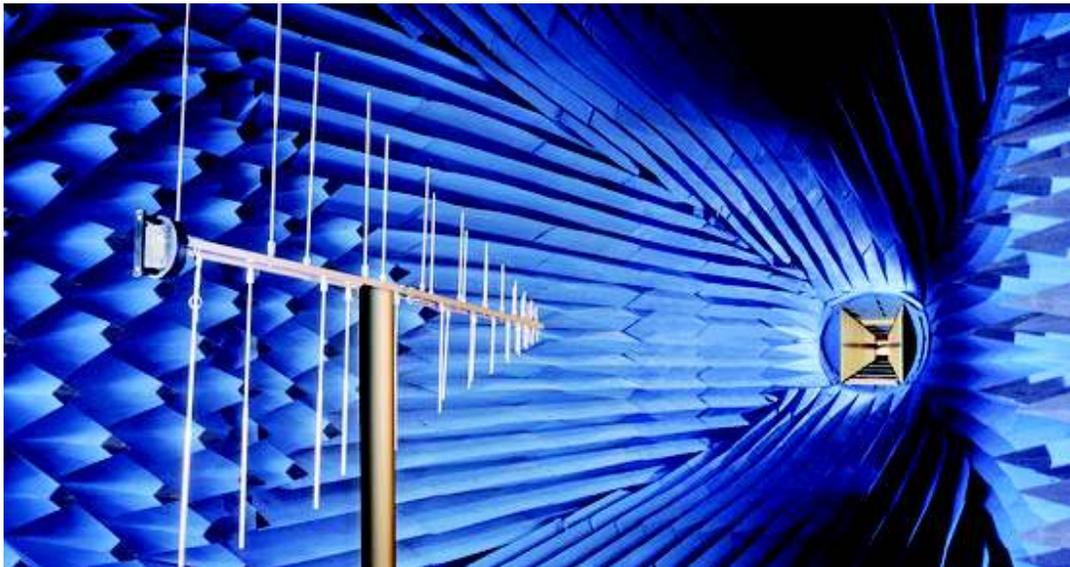
$h_R$  = Altura de la antena receptora respecto a tierra

### 1.6.3 CÁMARAS ANECOICAS

Las cámaras anecoicas fueron desarrolladas con el fin de realizar mediciones de antenas en una habitación, las desventajas que tenían las cámaras anecoicas era que las paredes reflejaban las señales y provocaban distorsión en el momento de obtener los patrones de radiación [3].

La palabra anecoica significa sin eco, para evitar la interferencia externa las paredes son usualmente metalizadas, es decir estas paredes absorben radio frecuencia e impiden reflexiones [3].

En un extremo de la cámara se ubica la antena que se encargará de excitar a la antena de prueba, al otro extremo se ubica en un plato giratorio que rota en el plano  $x - y$ , de esta manera se obtiene el patrón de radiación en dos dimensiones [3], esta distribución de antenas y las paredes cubiertas se las puede visualizar en la Figura 1.25.



**Figura 1. 25** Cámara Anecoica con antena de prueba [27]

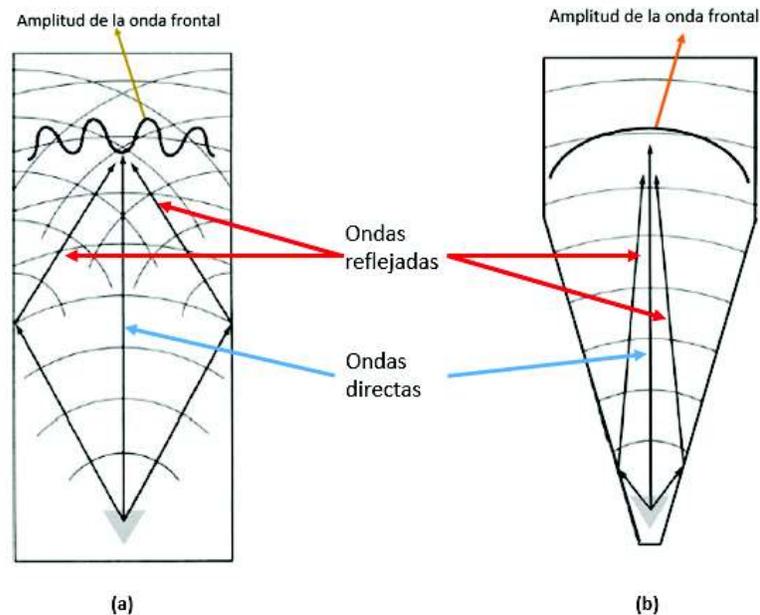
Las cámaras anecoicas tienen ciertas limitaciones debido a tres aspectos, a las reflexiones que provienen de las paredes de la cámara, la ubicación y el cable de alimentación de la antena provocando falsos lóbulos de radiación.

Según estudios, las cámaras anecoicas proporcionan un índice de reflexión de -40 dB a frecuencias bajas como por ejemplo 100 MHz. Mientras más baja es la

frecuencia de operación, el espesor de las paredes de la cámara debe aumentar a fin de mantener el rendimiento de reflectividad [3].

Las formas de las cámaras anecoicas son diseñadas con el fin de minimizar las reflexiones producidas por las paredes sobre un rango de frecuencias y ángulos incidentes.

Hay dos tipos de cámaras anecoicas, rectangulares que son usualmente diseñadas para simular condiciones de espacio libre y maximizar el volumen de la zona tranquila<sup>3</sup> y las cónicas que toman la forma de bocina piramidal, en su parte inicial empieza con una cámara cónica continua a una configuración rectangular en la que se ubicará la antena de prueba [2].



**Figura 1. 26** Tipos de Cámaras Anecoicas: a) Rectangular, b) Cónica [2]

En la Figura 1.26 se muestran los dos tipos de cámaras anecoicas anteriormente descritas en las que se evidencia claramente su diseño y como las ondas viajan unas directamente y otras se reflejan en las paredes de la cámara.

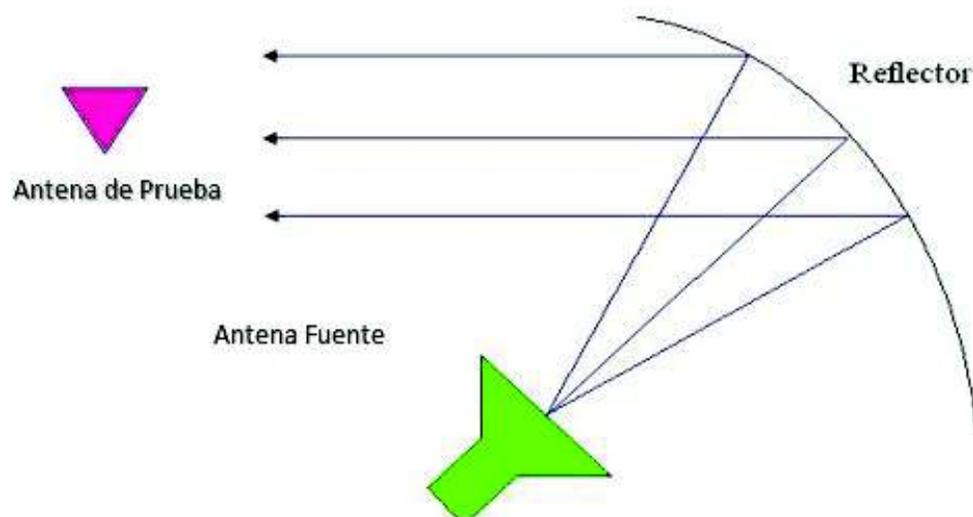
Lo que difiere a las cámaras rectangulares de las cámaras cónicas, además de su forma, es la diferencia de fase entre la onda directa y la onda reflejada, mientras la

<sup>3</sup> Espacio definido dentro de la cámara anecoica donde va a ser colocada la antena de prueba.

onda reflejada inicia lo más cerca de la antena fuente el desfase será menor, es decir la fase entre la onda directa y reflejada serán casi iguales.

#### 1.6.4 CATR (*COMPACT ANTENNA TEST RANGE*, PRUEBA DE ALCANCE DE ANTENA COMPACTA)

Este método es similar al anteriormente expuesto, la diferencia radica en que la antena fuente no se encuentra frente a la antena de prueba, está desplazada, emitiendo su energía a un reflector parabólico dentro de una cámara anecoica como se puede observar en la Figura 1.27, el reflector parabólico convierte las ondas esféricas que inciden a ondas planas, la antena que va a ser sometida a pruebas debe ser más pequeña que la antena reflectora [2]- [3].



**Figura 1. 27** Elementos Distribuidos dentro de la Cámara Anecoica por el método CATR [2]

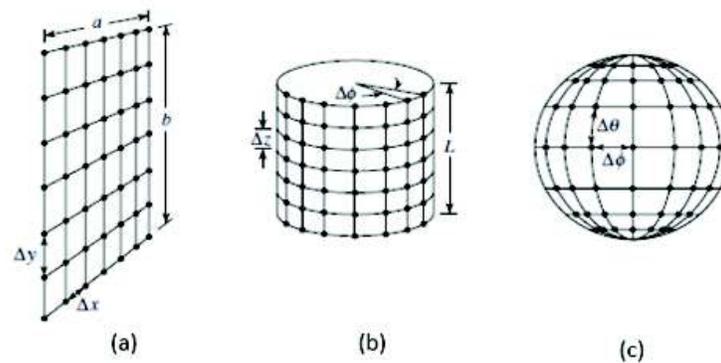
#### 1.6.5 CAMPO CERCANO

Las mediciones tomadas en campo cercano son realizadas sobre una superficie seleccionada que puede ser plana, cilíndrica o esférica, mediante métodos analíticos, transformadas de Fourier, los datos medidos permite calcular las características de radiación de campo lejano [2].

Tanto el método de campos planos y cilíndricos son usados mayormente para medir la apertura de antenas y arreglos [3].

Para antenas que operan a altas frecuencias el método más apropiado son los sistemas planos, por ejemplo arreglos de fase, que no necesita muchos cálculos ni movimiento de la antena.

El sistema cilíndrico requiere mayor cantidad de cálculos con respecto al plano y no es muy costoso con respecto al equipo para mediciones, por último el sistema esférico tiene un equipo de computación y de pruebas costoso [2], la Figura 1.28 muestra los métodos por campo cercano en los diferentes planos.



Donde:

$\Delta x = \Delta y = \lambda/2$  espacio máximo de la muestra de campo cercano

$\Delta \Phi$  espaciamiento máximo de la muestra angular

$\Delta z$  espaciamiento máximo de la muestra vertical

$\Delta \theta$  espaciamiento máximo de la muestra vertical

**Figura 1. 28** Campo Cercano: (a) Planares, (b) Cilíndrico y (c) Esférico [2]

## 1.7 APLICACIONES EN LA BANDA DE 5.8 GHZ

Las antenas que operan en altas frecuencias en el orden de los GHz son usadas en varios campos como en el científico, industrial y en la medicina, en donde se requiere alta ganancia y baja potencia.

Este tipo de aplicaciones inalámbricas operan en bandas no licenciadas, es decir que no se necesita pasar por un proceso de concesión para operar en dichas bandas; se busca trabajar con longitudes de onda milimétricas que permitan

comunicaciones bidireccionales a una velocidad de datos que solo se la podía obtener trabajando con fibra óptica entre 5 a 7 Gb/s, otros beneficios que se obtiene en estas bandas es inmunidad a la interferencia con redes adyacentes, alto nivel de seguridad y re uso de frecuencias.

### 1.7.1 REDES WBAN

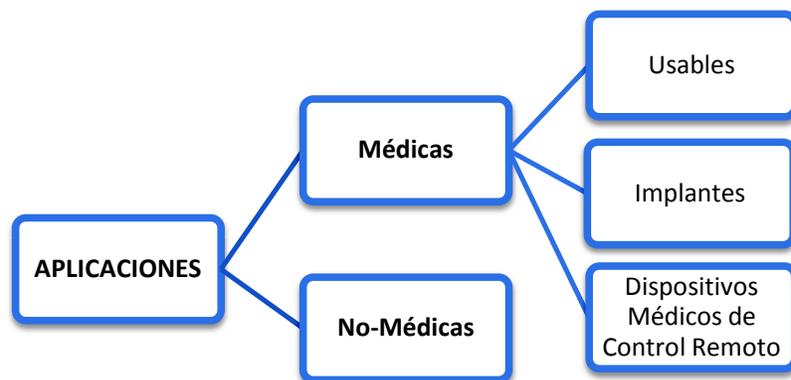
Una de las áreas de aplicación a altas frecuencias es WBAN (*Wireless Body Area Network*, Redes de Área Corporal Inalámbrica), el estándar 802.15.6 comprende el acceso físico y al medio de redes de área corporal, se tienen 3 capas físicas NB (*Narrowband*, Banda Angosta), UWB (*Ultra Wide Band*, Banda Ultra Ancha) y HBC (*Human Body Communication*, Comunicación del Cuerpo Humano), la selección de la capa física depende del tipo de aplicación [28].

WBAN es una organización que se basa en el diseño de redes que interactúan con el cuerpo humano, con tecnología de baja potencia, equipos pequeños e inalámbricos portátiles o que pueden ser implantados en un ser humano.

Aplicaciones a 5.8 GHz pueden soportar altas velocidades de transmisión para redes inalámbricas.

#### 1.7.1.1 Aplicaciones de las Redes WBAN

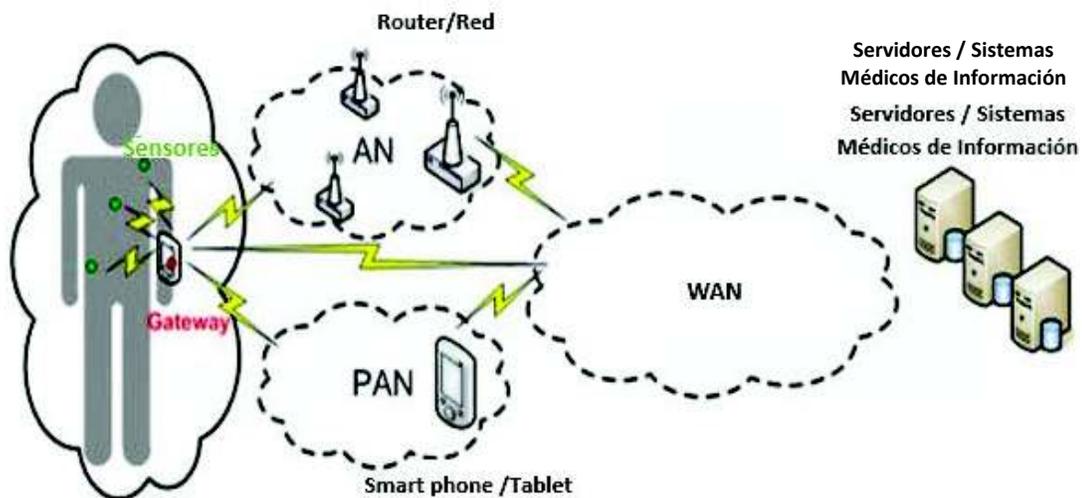
Las aplicaciones en las redes WBAN se clasifican en médicas y no-médicas, esta última se refiere a aplicaciones de tecnología como cámaras, mp3, video en streaming entre otras, ambas clasificaciones tienen como objetivo común mejorar la calidad de vida de las personas, la Figura 1.29 se observa lo anteriormente expuesto.



**Figura 1. 29** Clasificación de Redes WBAN

### 1.7.1.1.1 Aplicaciones Médicas

Una red WBAN está conformada por nodos pequeños, cada uno de ellos contienen sensores biomédicos, detectores de movimiento y dispositivos de comunicación inalámbrica, cada uno de baja potencia, tienen la función de recibir los signos vitales del cuerpo humano y enviar los datos a una central donde esta información es procesada e interpretada [29] como lo muestra la Figura 1.30.



**Figura 1. 30** Diagrama de una red WBAN [30]

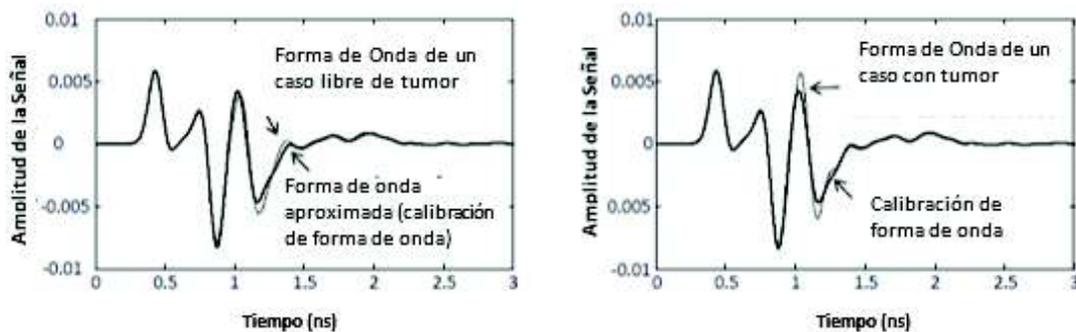
La necesidad de investigar el comportamiento de las antenas y sus ondas de propagación en el cuerpo humano, permitió el desarrollo de varias aplicaciones entre ellas la detección temprana de enfermedades como la obesidad, hipertensión u otras enfermedades crónicas y cancerígenas.

Un continuo monitoreo del cuerpo humano mediante el uso de sensores y en base a los resultados que se obtienen facilitan un tratamiento preventivo y a tiempo por parte del médico en turno [31].

Estos tipos de dispositivos pueden ser capaces de detectar tumores, especialmente en la detección de cáncer de seno, operando en sistemas de banda ancha, con el envío de pulsos en el dominio del tiempo, y con los resultados de los pulsos enviados, se compara con la respuesta de tejidos normales y cancerígenos.

La constante dieléctrica de un tejido en condiciones normales es un valor menor que el de un tejido cancerígeno lo que permite distinguir uno del otro.

Es decir cuando se analiza un tejido que se encuentra en buenas condiciones las propiedades dieléctricas son semejantes a las de un tejido modelo en condiciones normales, las ondas obtenidas a consecuencia de los impulsos proporcionados varían en un valor pequeño a diferencia de la reacción en tejidos malignos, en la Figura 1.31 se presentan los dos casos, a la izquierda un tejido benigno y a la derecha la presencia de un tejido cancerígeno [32].



**Figura 1. 31** Gráficas obtenidas de tejidos normales y cancerígenos [32]

Los problemas encontrados con la detección de cáncer de mama mediante el uso de mamografías por medio de rayos-X que opera en el rango de frecuencias de 30 PHz a 30 EHz, han llevado a la búsqueda de otras opciones para la detección del cáncer de seno.

Las mamografías normales por medio de los rayos-X no permiten encontrar con exactitud y a tiempo la presencia de tejidos malignos o incluso se puede presentar la probabilidad de obtener resultados falsos y además de tener lesiones debido a los rayos-X [32].

#### 1.7.1.1.2 Aplicaciones No-médicas

Son aplicaciones que no se destinan al campo médico, pero que se diseñan en las redes WBAN:

- Transmisión en tiempo real de video.
- Aplicaciones de entretenimiento como cámaras, juegos mp3, juegos virtuales.

- Sensores que son capaces de detectar fuego o gas inflamable.
- Biosensores que permiten interpretar las emociones humanas, como el miedo, por medio de la sudoración de las manos y aumento de palpitations del corazón.
- Seguridad por medio de la autenticación, como reconocimiento de iris, huellas dactilares como se observa en la Figura 1.32 y patrones faciales.

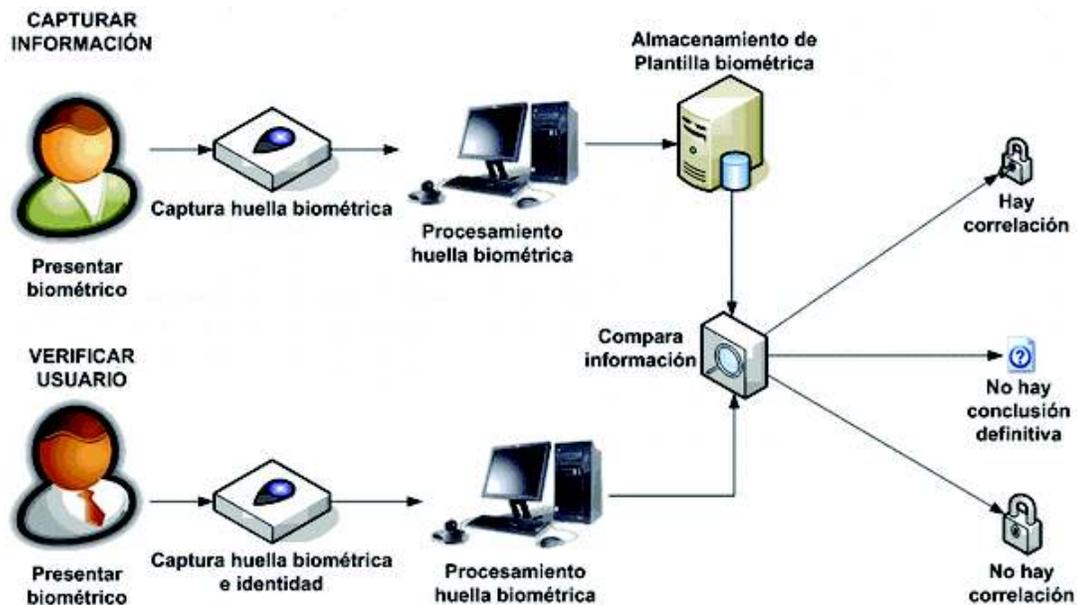


Figura 1. 32 Proceso de Autenticación de Huellas Dactilares [33]

## 1.7.2 CANALES DE COMUNICACIÓN

El estándar 802.15.6 tiene varios tipos de canales de comunicación según el tipo de aplicación, los canales de comunicación dependen de la localización de los dispositivos en el cuerpo humano.

### 1.7.2.1 Canal off-body

Este tipo de canal se usa cuando la comunicación es entre un dispositivo que se encuentra sobre el cuerpo humano con un dispositivo externo, puede ser que esté en un objeto o en otro ser humano, por ejemplo las comunicaciones móviles.

El rango de cobertura en este caso de comunicaciones varía de entre unidades de metros a decenas de metros, por lo que las aplicaciones son usadas mayormente en redes inalámbricas PAN (*Personal Area Network*, Red de Área Personal).

#### **1.7.2.2 Canal on-body**

El canal on-body se usa cuando la comunicación es entre dispositivos que están en el ser humano y en dispositivos portátiles, en las comunicaciones desarrolladas en este tipo de canal la cobertura está en el rango máximo de aproximadamente dos metros [34].

#### **1.7.2.3 Canal in-body**

Cuando se quiere realizar la comunicación entre un dispositivo que está implantado dentro de un ser humano y otro dispositivo que está sobre la superficie del cuerpo humano [34].

#### **1.7.2.4 Canal inter-body**

Este tipo de canal es semejante al canal off-body, es decir cuando la comunicación es externa al cuerpo que interactúa con un dispositivo portátil, la diferencia radica en que en este canal la comunicación con el dispositivo portátil se realiza con otras redes BAN (*Body Area Network*, Red de Área Corporal) inalámbricas.

Cuando la onda se propaga dentro del cuerpo humano las pérdidas se producen por la absorción de la energía en los tejidos, es decir las ondas electromagnéticas son atenuadas considerablemente antes de llegar al receptor, la atenuación dentro del cuerpo humano es muy alta en comparación con la que se produce en el espacio libre. Un factor que influye en esta atenuación es el lugar y la forma de la parte del cuerpo donde se localiza el implante [35].

Las bandas de frecuencia en las que operan las redes WBAN (*Wireless Body Area Network*, Redes de Área Corporal Inalámbricas) dependen de donde se desarrolle la aplicación, la clasificación de las frecuencias se muestra en la Tabla 1.2.

**Tabla 1. 2** Bandas de Frecuencias de Reden WBAN [35]

| <b>WBANS</b> | <b>Banda de Frecuencias</b>  |
|--------------|--|
| Implantes    | 402-405 MHz (MICS, <i>Medical Implanted Communication Services</i> , Servicios de Comunicación para Implantes Médicos) |
| On-body      | 5.5, 13.5, 400, 600 y 900 MHz  |
|              | 2.4-2.5 GHz (ISM, <i>Industrial Scientific and Medical</i> , Industrial, Científica y Médica)                          |
|              | 3.1-10.6 GHz (UWB, <i>Ultra Wide Band</i> , Banda Ultra Ancha)   |

Las aplicaciones en WBAN son redes de comunicaciones de sensores que pueden ser localizados sobre, dentro o alrededor del cuerpo humano debido a la baja potencia de operación que no produce daño en el tejido humano [34].

El dispositivo es localizado en un sitio en donde no cause molestia al ser humano, normalmente se localiza cerca del torso, caderas o pecho; la elección del canal de comunicación depende del tipo de aplicación que se desee implementar [34].

## CAPÍTULO II

### DISEÑO ANALÍTICO DE LA ANTENA

En este capítulo se abordará el diseño de los elementos que forman la antena Yagi, el elemento conductor se diseñará en base a fórmulas existentes en la tecnología microstrip, este diseño se realizará en tres tipos de sustrato.

El diseño de los elementos directores y reflector se realizarán en base a dos métodos de diseño: tablas de diseño y ecuaciones obtenidas de una calculadora de antenas Yagi que se encuentran disponible en línea.

La antena va a diseñarse considerando la frecuencia de 5.8 GHz.

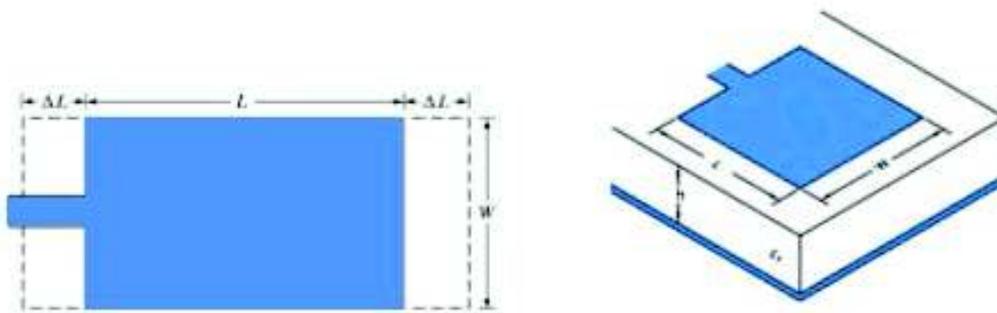
#### 2.1 SELECCIÓN DEL TIPO DE SUSTRATO

Con el fin de seleccionar el mejor sustrato que permita tener mayor ganancia y menos pérdidas se diseñará el elemento radiante en 3 materiales y en base a los resultados obtenidos en la simulación se elegirá el que brinde mejores resultados.

##### 2.1.1 CÁLCULO DEL ELEMENTO CONDUCTOR

El elemento conductor o *driven* es elemento donde la línea de alimentación se une desde el transmisor a la antena Yagi para transferir energía.

A continuación se presentan las ecuaciones y cálculos para el diseño del elemento radiante como se ejemplifica en la Figura 2.1.



**Figura 2. 1** Diseño Elemento Radiante [36]

Como primer paso se procede al cálculo del ancho de elemento mediante el uso de la ecuación (2.1) [2].

$$W \approx \frac{c}{2f_o \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (2.1)$$

Donde:

$W$  = Ancho del elemento radiante

$c$  = Velocidad de la luz

$f_o$  = Frecuencia de diseño

$\epsilon_r$  = Constante dieléctrica relativa del sustrato

Antes de calcular la variación de longitud y el largo del conductor es necesario calcular previamente el valor de la constante dieléctrica efectiva del sustrato para ello se emplea la ecuación (2.2) [2].

$$\epsilon_{reff} \approx \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)^{-1/2} \quad (2.2)$$

Donde:

$\epsilon_{reff}$  = Constante dieléctrica efectiva del sustrato

$h$  = Grosor del sustrato

La variación de longitud del elemento conductor se obtiene en función de la constante dieléctrica efectiva y se calcula mediante la ecuación (2.3) [2].

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (2.3)$$

Donde:

$\Delta L$  = Variación de longitud del elemento radiante

Para calcular la longitud efectiva del parche se usa la ecuación (2.4), que depende de la constante dieléctrica y la frecuencia de resonancia de la antena [2].

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (2.4)$$

Donde:

$L_{eff}$  = Longitud efectiva del elemento radiante

Finalmente se calcula la longitud del parche que depende de la longitud efectiva y de la variación de longitud como muestra la ecuación (2.5).

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (2.5)$$

Donde:

L = Longitud del elemento radiante

A continuación se describirán brevemente los tipos de sustrato y se realizarán los cálculos con las ecuaciones anteriormente descritas para diseño del elemento conductor.

#### 2.1.1.1 Cálculo del elemento radiante con el sustrato FR-4

FR-4 es un material de vidrio reforzado de combustión lenta, bajo costo, de buenas características mecánicas y eléctricas, tiene mayor índice de pérdidas y factor de disipación que los sustratos de altas frecuencias, como por ejemplo las aplicaciones más típicas de FR4 son de audio [37].

**Tabla 2. 1** Características del sustrato FR-4 [38]

| <b>FR-4</b>              |        |
|--------------------------|--------|
| Constante Dieléctrica    | 4.4    |
| Espesor del sustrato (h) | 1.6 mm |

En el ANEXO A se presentan las características completas del sustrato FR-4 expuestas en la Tabla 2.1.

Se procede a calcular las medidas del elemento conductor con las ecuaciones antes mencionadas, primero se calcula el ancho del elemento.

$$W \approx \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2(5.8 \times 10^9 \text{ Hz}) \sqrt{\frac{(4.4 + 1)}{2}}}$$

$$W \approx 0.01589 \text{ m} = 15.89 \text{ mm}$$

Antes de calcular la longitud del conductor se debe calcular la constante dieléctrica efectiva y la variación de longitud del elemento.

$$\epsilon_{\text{reff}} \approx \frac{4.4 + 1}{2} + \frac{4.4 - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{0.0016 \text{ m}}{0.01589 \text{ m}}\right)^{-1/2}$$

$$\epsilon_{\text{reff}} \approx 3.76$$

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(3.76 + 0.3) \left(\frac{0.01589 \text{ m}}{0.0016 \text{ m}} + 0.264\right)}{(3.76 - 0.258) \left(\frac{0.01589 \text{ m}}{0.0016 \text{ m}} + 0.8\right)}$$

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.4538$$

Despejando  $\Delta L$  se tiene:

$$\Delta L = 0.4538(0.0016 \text{ m})$$

$$\Delta L = 0.00726 \text{ m} = 0.726 \text{ mm}$$

La longitud efectiva del conductor se obtiene en base a los resultados anteriores:

$$L_{\text{eff}} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2(5.8 \times 10^9 \text{ Hz}) \sqrt{3.76}}$$

$$L_{\text{eff}} = 0.0133 \text{ m} = 13.3 \text{ mm}$$

Finalmente se calcula la longitud del elemento radiante:

$$L = 13.3 \text{ mm} - 2(0.726 \text{ mm})$$

$$L = 11.848 \text{ mm}$$

### 2.1.1.2 Cálculo del elemento conductor con el sustrato RO4003c

RO4003c es un material de vidrio tejido reforzado, que proporciona un control en la constante dieléctrica para brindar bajas pérdidas.

Las aplicaciones típicas en el que se emplea este tipo de sustrato son estaciones base de antenas celulares, radares y sensores automotrices, entre otros [39].

**Tabla 2. 2** Características del sustrato RO4003c [38]

| <b>RO4003c</b>          |          |
|-------------------------|----------|
| Constante Dieléctrica   | 3.38     |
| Espesor de sustrato (h) | 1.524 mm |

Las características completas del sustrato RO4003c expuestas en la Tabla 2.2 se presentan en el ANEXO B.

De la misma forma que los cálculos con el sustrato anterior se procede a calcular el ancho del elemento radiante.

$$W \approx \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2(5.8 \times 10^9 \text{ Hz}) \sqrt{\frac{(3.38 + 1)}{2}}}$$

$$W \approx 0.017476 \text{ m} = 17.476 \text{ mm}$$

Se calcula el valor de la constante eléctrica efectiva y la variación de longitud del conductor.

$$\epsilon_{\text{reff}} \approx \frac{3.38 + 1}{2} + \frac{3.38 - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{0.001524 \text{ m}}{0.017476 \text{ m}}\right)^{-1/2}$$

$$\epsilon_{\text{reff}} \approx 3.022$$

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(3.022 + 0.3) \left(\frac{0.017476 \text{ m}}{0.001524 \text{ m}} + 0.264\right)}{(3.022 - 0.258) \left(\frac{0.017476 \text{ m}}{0.001524 \text{ m}} + 0.8\right)}$$

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.474$$

$$\Delta L = 0.47287(0.001524m)$$

$$\Delta L = 0.0007217m = 0.722mm$$

Como la longitud del conductor depende de la longitud efectiva del conductor y la variación de longitud, se calcula primero la longitud efectiva y a continuación la longitud del elemento radiante.

$$L_{eff} = \frac{3 \times 10^8 m/s}{2(5.8 \times 10^9 Hz) \sqrt{3.022}}$$

$$L_{eff} = 0.014877m = 14.877mm$$

$$L = 14.877mm - 2(0.722mm)$$

$$L = 13.433mm$$

### 2.1.1.3 Cálculo del elemento conductor con el sustrato RO5880

RT/duroid 5880 es un material de vidrio reforzado empleado para el diseño de circuitos microstrip, el factor de disipación es bajo y es resistente a reactivos, disolventes, temperaturas frías y calientes.

Las aplicaciones más comunes de este tipo de sustrato son circuitos microstrip y stripline, aplicaciones de ondas milimétricas, sistemas de radares militares y guía de misiles [40].

**Tabla 2. 3** Características del sustrato RO5880 [38]

| <b>RO5880</b>            |          |
|--------------------------|----------|
| Constante Dieléctrica    | 2.2      |
| Espesor del sustrato (h) | 1.575 mm |

En el ANEXO C se presenta las características completas del sustrato RO5880 expuestas en la Tabla 2.3.

Finalmente se calculan las dimensiones del elemento radiante con el tercer sustrato igual que con los sustratos anteriores, el cálculo del ancho del elemento radiante se presenta a continuación:

$$W \approx \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2(5.8 \times 10^9 \text{ Hz}) \sqrt{\frac{(2.2 + 1)}{2}}}$$

$$W \approx 0.020446 \text{ m} = 20.446 \text{ mm}$$

Previo al cálculo de la longitud del elemento radiante se calcula la constante dieléctrica efectiva y la variación de longitud.

$$\varepsilon_{\text{reff}} \approx \frac{2.2 + 1}{2} + \frac{2.2 - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{0.001575 \text{ m}}{0.020446 \text{ m}}\right)^{-1/2}$$

$$\varepsilon_{\text{reff}} \approx 2.033$$

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(2.033 + 0.3) \left(\frac{0.020446 \text{ m}}{0.001575 \text{ m}} + 0.264\right)}{(2.033 - 0.258) \left(\frac{0.020446 \text{ m}}{0.001575 \text{ m}} + 0.8\right)}$$

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.52$$

$$\Delta L = 0.52(0.001575 \text{ m})$$

$$\Delta L = 0.00082 \text{ m} = 0.82 \text{ mm}$$

La longitud del parche se obtiene mediante las siguientes ecuaciones:

$$L_{\text{eff}} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2(5.8 \times 10^9 \text{ Hz}) \sqrt{2.033}}$$

$$L_{eff} = 0.018138m = 18.138mm$$

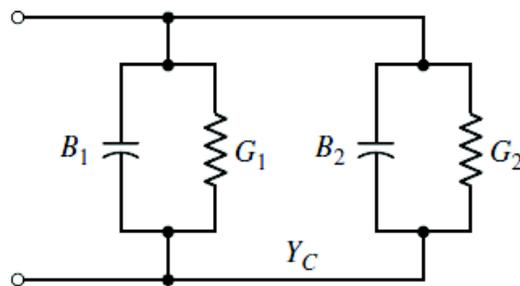
$$L = 18.138mm - 2(0.82mm)$$

$$L = 16.498mm$$

### 2.1.2 CÁLCULO DE IMPEDANCIA

En el elemento conductor se necesita acoplar una impedancia determinada de  $50\Omega$  como impedancia de salida.

El circuito equivalente del parche radiante se observa en la Figura 2.2 [2].



**Figura 2. 2** Circuito equivalente del modelo de línea de transmisión

Como primer paso se procede a calcular la impedancia que originalmente se obtiene del diseño, para lo cual se calcula el valor de la admitancia que está definida por la ecuación (2.6):

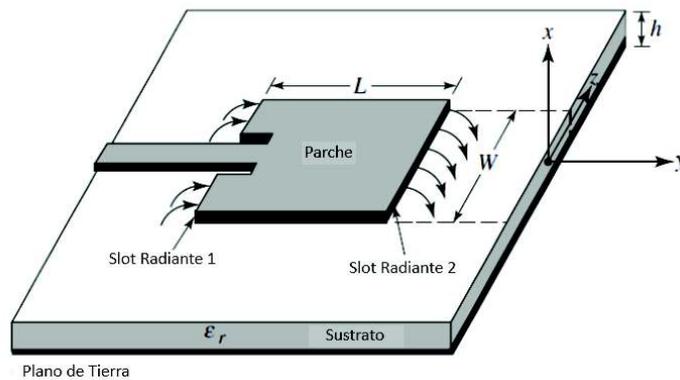
$$Y = G + jB \quad (2.6)$$

Donde:

Y = Admitancia

G = Conductancia

B = Susceptancia



**Figura 2. 3** Radiación entre slots del elemento radiante [2]

Para el caso del elemento radiante la admitancia total está definida por la suma de las admitancias de cada slot<sup>4</sup> como se muestra en la Figura 2.3, ecuación (2.7) y (2.8) [2]:

$$Y = Y_1 + Y_2 \quad (2.7)$$

$$Y = (G_1 + jB_1) + (G_2 + jB_2) \quad (2.8)$$

Se transfiere la admitancia del slot dos a los terminales de salida, idealmente los dos slots están separados  $\lambda/2$  (condición de resonancia), pero en la realidad esta separación es un poco menor que  $\lambda/2$ . Como ambos slots son iguales las admitancias y susceptancias son iguales, lo que difiere una susceptancia es en el signo debido a que se le suma una fase de  $180^\circ$  como se observa en la Figura 2.3, entonces la relación de la susceptancia del slot 1 y del slot 2 se define en la ecuación (2.9):

$$B_2 = -B_1 \quad (2.9)$$

La conductancia de ambos slots es igual en magnitud y signo, ecuación (2.10):

$$G_2 = G_1 \quad (2.10)$$

Entonces el valor de la admitancia total reemplazando las equivalencias de  $G_2$  y  $B_2$  se define como muestra la ecuación (2.11) [2]:

---

<sup>4</sup> Ranura en el plano de tierra en donde se acopla la línea de alimentación y el elemento radiante.

$$Y = (G_1 + jB_1) + (G_1 - jB_1)$$

$$Y = 2G_1 \quad (2.11)$$

La impedancia de entrada del circuito es el inverso de la admitancia, las ecuaciones (2.12) y (2.13) se obtienen de las ecuaciones anteriormente descritas:

$$R_{in} = \frac{1}{Y} \quad (2.12)$$

$$R_{in} = \frac{1}{2G_1} \quad (2.13)$$

Se presentan dos ecuaciones (2.14) (2.15) para el cálculo de  $G_1$  y dependerá del valor del ancho del elemento conductor para determinar que ecuación se tomará en cuenta [2]:

a) Cuando  $W \ll \lambda$

$$G_1 = \frac{1}{90} \left(\frac{W}{\lambda}\right)^2 \quad (2.14)$$

b) Cuando  $W \gg \lambda$

$$G_1 = \frac{1}{120} \left(\frac{W}{\lambda}\right) \quad (2.15)$$

La resistencia de entrada en la ecuación anterior no toma en cuenta la conductancia mutua que se presenta en los slots, para ello la ecuación (2.16) permite tener en cuenta este aspecto teniendo así un cálculo más preciso, siendo la conductancia mutua un valor menor a la conductancia propia [2].

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[ \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right]^2 J_0(k_0 L \sin \theta) \sin^3 \theta d\theta \quad (2.16)$$

Donde:

$G_{12}$  = Conductancia mutua

$J_0$  = Función de Bessel de orden cero y primera clase.

$k_0 = 2\pi/\lambda$

Entonces se tiene que la impedancia de entrada se describe por la ecuación (2.17), el signo (+) se usa para modos de distribución asimétrica de voltaje bajo el parche y entre slots y el signo (-) para distribución uniforme [2]:

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \quad (2.17)$$

Como la impedancia de entrada depende exclusivamente del valor de la conductancia propia y mutua se procede al cálculo de la misma.

Al ser  $W \ll \lambda$  se calcula la conductancia con la opción a) para los tres tipos de sustrato y la conductancia mutua.

### 2.1.2.1 Cálculo de la impedancia con el sustrato FR-4

Al ser la conductancia el inverso de la resistencia se procede a calcular el valor de conductancia y conductancia mutua cuando el ancho del elemento radiante es menor que la longitud de onda, en base a las ecuaciones anteriormente mencionadas se tiene:

$$W \approx 0.01589m = 15.89mm$$

$$\lambda = 0.05172m = 51.72mm$$

$$G_1 = \frac{1}{90} \left( \frac{0.01589m}{0.05172m} \right)^2$$

$$G_1 = 0.001049$$

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[ \frac{\sin \left( \frac{2\pi}{51.72} \frac{(15.89)}{2} \cos \theta \right)}{\cos \theta} \right]^2 (0.2423) \left( \frac{2\pi}{51.72} (11.848) \sin \theta \right) \sin^3 \theta d\theta$$

$$G_{12} = 0.000315447$$

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

$$R_{in} = \frac{1}{2(0.001049 + 0.000315447)}$$

$$R_{in} = 366.449\Omega$$

### 2.1.2.2 Cálculo de la impedancia con el sustrato RO4003c

De igual forma que en el apartado anterior se calcula el valor de conductancia y conductancia mutua para obtener el cálculo de la resistencia de entrada.

$$W \approx 0.017476m = 17.476mm$$

$$\lambda = 0.05172m = 51.72mm$$

$$G_1 = \frac{1}{90} \left( \frac{0.017476m}{0.05172m} \right)^2$$

$$G_1 = 0.001268$$

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[ \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{51.72} \frac{(17.476)}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 (0.2423) \left( \frac{2\pi}{51.72} (13.433) \sin\theta \right) \sin^3\theta d\theta$$

$$G_{12} = 0.0004256$$

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

$$R_{in} = \frac{1}{2(0.001268 + 0.0004256)}$$

$$R_{in} = 295.229\Omega$$

### 2.1.2.3 Cálculo de la impedancia con el sustrato RO5880

Finalmente se calcula el valor de la resistencia para el tercer tipo de sustrato como en los sustratos anteriores.

$$W \approx 0.020446m = 20.446mm$$

$$\lambda = 0.05172m = 51.72mm$$

$$G_1 = \frac{1}{90} \left( \frac{0.020446m}{0.05172m} \right)^2$$

$$G_1 = 0.001736$$

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[ \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{51.72} \frac{(20.446)}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right]^2 (0.2423) \left( \frac{2\pi}{51.72} (16.498) \sin \theta \right) \sin^3 \theta d\theta$$

$$G_{12} = 0.000703884$$

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

$$R_{in} = \frac{1}{2(0.001736 + 0.000703884)}$$

$$R_{in} = 204.928\Omega$$

### 2.1.3 CÁLCULO DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

El tipo de alimentación que se va a emplear es línea microstrip con inserciones, este tipo de alimentación permite un mejor acople de impedancia.

Para el diseño de la línea de transmisión se debe tener en consideración el ancho  $W_o$  y longitud de la línea  $L_{Ta}$  para lo cual se tienen las siguientes ecuaciones (2.18) o (2.19) y (2.20) respectivamente [2]:

- Ancho de la línea de transmisión

a) Cuando  $\frac{W}{h} \leq 1$

$$Z_o = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \ln \left[ \frac{8h}{W_o} + \frac{W_o}{4h} \right] \quad (2.18)$$

Donde:

$Z_o$  = Impedancia de la antena

$W_o$  = Ancho de la línea de transmisión

b) Cuando  $\frac{W}{h} > 1$

$$Z_o = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{reff}} \left[ \frac{W_o}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{W_o}{h} + 1.444 \right) \right]} \quad (2.19)$$

- Longitud de la línea de transmisión

$$L_{Ta} = \frac{\lambda}{4\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (2.20)$$

Donde:

$L_{Ta}$  = Ancho de la línea de transmisión

$\lambda$  = Longitud de onda

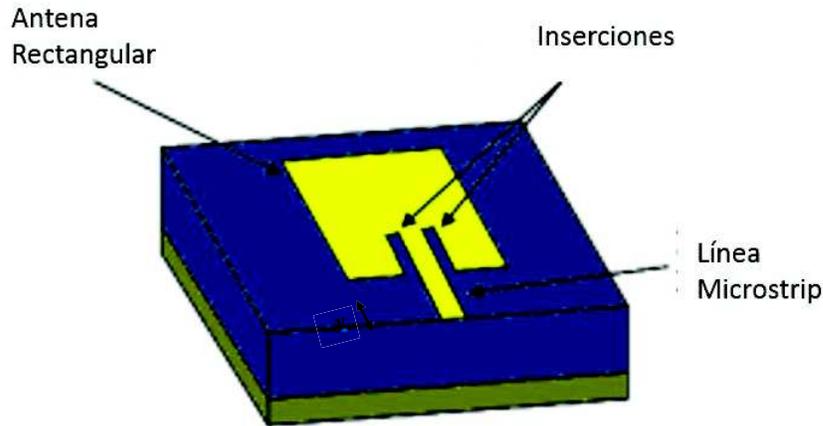
Como el método de alimentación es mediante inserciones se debe calcular a que altura desde la base del elemento radiante empieza la inserción como se observa en la Figura 2.4, esta distancia se determina mediante la ecuación (2.21) [2].

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \cos^2 \left( \frac{\pi}{L} y_0 \right) \quad (2.21)$$

Donde:

$R_{in}$  = Resistencia de entrada

$y_0$  = Longitud de la inserción



**Figura 2. 4** Alimentación por Inserciones [41]

### 2.1.3.1 Cálculo de la línea de alimentación con el sustrato FR-4

Primero se obtiene el valor de la relación del ancho del elemento radiante respecto a la longitud de onda para determinar que ecuación se usará para calcular el ancho de la línea de alimentación.

$$\frac{W}{h} = \frac{15.89mm}{1.6mm}$$

$$\frac{W}{h} = 9.93$$

$$\frac{W}{h} > 1$$

Se calcula el ancho de la línea de transmisión con la ecuación (2.19) debido a que la relación anteriormente calculada es mayor a 1.

$$Z_o = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{reff}} \left[ \frac{W_o}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{W_o}{h} + 1.444 \right) \right]}$$

$$50\Omega = \frac{120\pi}{\sqrt{3.76} \left[ \frac{W_o}{1.6mm} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{W_o}{1.6mm} + 1.444 \right) \right]}$$

$$W_o = 3 mm$$

La longitud de la línea de alimentación se calcula en base a la constante dieléctrica efectiva que se obtuvo cuando se diseñó el elemento radiante.

$$L_{Ta} = \frac{\lambda}{4\sqrt{\epsilon_{reff}}}$$

$$L_{Ta} = \frac{0.05172m}{4\sqrt{3.76}}$$

$$L_{Ta} = 0.006668m = 6.668mm$$

A partir del valor de resistencia se calcula la longitud de la inserción.

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \cos^2\left(\frac{\pi}{L}y_0\right)$$

$$50 = 366.449 \cos^2\left(\frac{\pi}{11.848}y_0\right)$$

$$y_0 = 4.497 \text{ mm}$$

### 2.1.3.2 Cálculo de la línea de alimentación con el sustrato RO4003c

El ancho de la línea de alimentación se calcula partiendo de la relación entre el ancho del elemento radiante y la longitud de onda, luego se determina que ecuación se usará en base al valor que se obtiene de la relación.

$$\frac{W}{h} = \frac{17.476mm}{1.524mm}$$

$$\frac{W}{h} = 11.467$$

$$\frac{W}{h} > 1$$

$$Z_o = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{reff}} \left[ \frac{W_o}{h} + 1.393 + 0.667 \ln\left(\frac{W_o}{h} + 1.444\right) \right]}$$

$$50\Omega = \frac{120\pi}{\sqrt{3.022} \left[ \frac{W_o}{1.524mm} + 1.393 + 0.667 \ln\left(\frac{W_o}{1.524mm} + 1.444\right) \right]}$$

$$W_o = 3.25 \text{ mm}$$

Se calcula la longitud de la línea de alimentación.

$$L_{Ta} = \frac{\lambda}{4\sqrt{\epsilon_{reff}}}$$

$$L_{Ta} = \frac{0.05172m}{4\sqrt{3.011}}$$

$$L_{Ta} = 0.007451m = 7.45mm$$

Finalmente se calcula la longitud de inserción de la línea de alimentación.

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \cos^2\left(\frac{\pi}{L}y_0\right)$$

$$50 = 295.229 \cos^2\left(\frac{\pi}{13.391}y_0\right)$$

$$y_0 = 4.888 \text{ mm}$$

### 2.1.3.3 Cálculo de la línea de alimentación con el sustrato RO5880

Al igual que en los anteriores sustratos la relación entre el ancho del elemento radiante y la longitud de onda es mayor a 1 como se indica en el cálculo siguiente:

$$\frac{W}{h} = \frac{20.446mm}{1.575mm}$$

$$\frac{W}{h} = 12.9816$$

$$\frac{W}{h} > 1$$

$$Z_o = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{reff}} \left[ \frac{W_o}{h} + 1.393 + 0.667 \ln\left(\frac{W_o}{h} + 1.444\right) \right]}$$

$$50\Omega = \frac{120\pi}{\sqrt{2.033} \left[ \frac{W_o}{1.575mm} + 1.393 + 0.667 \ln\left(\frac{W_o}{1.575mm} + 1.444\right) \right]}$$

$$W_o = 5 \text{ mm}$$

La longitud de la línea de alimentación se calcula a continuación:

$$L_{Ta} = \frac{\lambda}{4\sqrt{\epsilon_{reff}}}$$

$$L_{Ta} = \frac{0.05172m}{4\sqrt{2.03}}$$

$$L_{Ta} = 0.009075m = 9.1mm$$

La longitud de la línea de alimentación se calcula en base al valor de resistencia que se desea acoplar.

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \cos^2\left(\frac{\pi}{L}y_0\right)$$

$$50 = 204.928 \cos^2\left(\frac{\pi}{16.49}y_0\right)$$

$$y_0 = 5.533 \text{ mm}$$

## 2.2 DISEÑO MEDIANTE TABLAS

El diseño de los elementos parásitos mediante tablas se basa en un estudio realizado de pruebas de campo con una antena Yagi operando a la frecuencia de 400 MHz y con elementos de diferentes diámetros.

A partir de los resultados obtenidos en [42], se diseñó una tabla para antenas que operen en las bandas de HF, VHF y UHF, es decir hasta 3 GHz y de longitud máxima  $4.2\lambda$  y con ganancia máxima de 14.2 dB [42], se tomará de base estos datos y se analizarán los resultados al simular la antena en el software seleccionado, cabe mencionar que las ganancias serán menores debido que en antenas microstrip una de las desventajas que se tiene es una menor ganancia en comparación con una antena normal.

Los aspectos a tomar en cuenta para el diseño son:

- Frecuencia de operación

- Ganancia requerida de la antena
- Material del conductor
- Permitividad eléctrica del sustrato

La tabla 2.4 muestra los valores obtenidos tras pruebas de campo, estos valores se presentan para algunos tamaños de antena, el número de elementos directores depende del valor de ganancia que se desea obtener, los valores que se presentan en la tabla 2.4 se encuentran en función de la longitud de onda excepto el valor de ganancia.

**Tabla 2. 4** Dimensionamiento de los elementos de una antena Yagi [42]

| <b>DIMENSIONAMIENTO DE UNA ANTENA YAGI</b>                           |      |              |              |              |              |              |              |
|--|------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Longitud de la antena Yagi (<math>\lambda</math>)</b>             |      | <b>0.4</b>   | <b>0.8</b>   | <b>1.2</b>   | <b>2.2</b>   | <b>3.2</b>   | <b>4.2</b>   |
| <b>Longitud del Reflector, <math>\lambda</math></b>                  |      | <b>0.482</b> | <b>0.482</b> | <b>0.482</b> | <b>0.482</b> | <b>0.482</b> | <b>0.475</b> |
| <b>Longitud de los Directores, <math>\lambda</math></b>              | 1st  | 0.424        | 0.428        | 0.428        | 0.432        | 0.428        | 0.424        |
|  | 2nd  |              | 0.424        | 0.42         | 0.415        | 0.42         | 0.424        |
|  | 3rd  |              | 0.428        | 0.42         | 0.407        | 0.407        | 0.42         |
|  | 4th  |              |              | 0.428        | 0.398        | 0.398        | 0.407        |
|  | 5th  |              |              |              | 0.39         | 0.394        | 0.403        |
|  | 6th  |              |              |              | 0.39         | 0.39         | 0.398        |
|  | 7th  |              |              |              | 0.39         | 0.386        | 0.394        |
|  | 8th  |              |              |              | 0.39         | 0.386        | 0.39         |
|  | 9th  |              |              |              | 0.398        | 0.386        | 0.39         |
|  | 10th |              |              |              | 0.407        | 0.386        | 0.39         |
|  | 11th |              |              |              |              | 0.386        | 0.39         |
|  | 12th |              |              |              |              | 0.386        | 0.39         |
|  | 13th |              |              |              |              | 0.386        | 0.39         |
|  | 14th |              |              |              |              | 0.386        |              |
|  | 15th |              |              |              |              | 0.386        |              |
| <b>Espaciamiento entre Directores, en <math>\lambda</math></b>       |      | 0.2          | 0.2          | 0.25         | 0.2          | 0.2          | 0.308        |
| <b>Ganancia Relativa para un dipolo <math>\lambda/2</math> en dB</b> |      | 7.1          | 9.2          | 10.2         | 12.25        | 13.4         | 14.2         |

El método de diseño planteado propone una tolerancia de  $\pm 0.003\lambda$  con respecto a los elementos diseñados.

### 2.2.1 CÁLCULO DE ELEMENTOS PARÁSITOS

Conforme a la tabla de diseño expuesta anteriormente se procede a calcular las dimensiones de los elementos parásitos (director(es) y reflector) y el tamaño total de la antena.

Es oportuno mencionar que el espaciamiento entre elementos es de  $0.2\lambda$  como se indica en la ecuación (2.22).

$$Esp = 0.2\lambda \quad (2.22)$$

$$Esp = 0.2(0.05172m)$$

$$Esp = 0.01034m = 10.34mm$$

Se presenta el diseño de 6 antenas Yagi de diferente tamaño y ganancia como se muestra en la Tabla 2.4, en donde se observa que para cada valor de ganancia el número de directores, la dimensión de los elementos parásitos y el espaciamiento entre elementos varía y están en función de la longitud de onda.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.23)$$

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 m/s}{5.8 GHz}$$

$$\lambda = 0.05172 m = 51.72mm$$

#### 2.2.1.1 Antena de longitud $0.4\lambda$

En base a la Tabla 2.4 con una longitud de  $0.4\lambda$  se tiene una ganancia de 7.1 dB, mediante las ecuaciones (2.24), (2.25) y (2.26) se calcula la longitud de la antena.

$$L_{antena} = 0.4\lambda \quad (2.24)$$

$$L_{antena} = 0.4(0.05172m)$$

$$L_{antena} = 0.02069m = 20.69 mm$$

Longitud del elemento reflector:

$$l_{reflector} = 0.482\lambda \quad (2.25)$$

$$l_{reflector} = 0.482(0.05172m)$$

$$l_{reflector} = 0.02493m = 24.93mm$$

Se calcula la longitud del director de acuerdo a la Tabla 2.4:

$$l_{1st\ director} = 0.424\lambda \quad (2.26)$$

$$l_{1st\ director} = 0.424(0.05172m)$$

$$l_{1st\ director} = 0.02193m = 21.93mm$$

### 2.2.1.2 Antena de longitud $0.8\lambda$

La antena con una longitud de  $0.8\lambda$  tiene una ganancia de 9.2 dB según la Tabla 2.4, las ecuaciones (2.27), (2.28), (2.29) y (2.30) describen el procedimiento para el cálculo tanto de la longitud de la antena como del reflector y los directores respectivamente.

$$L_{antena} = 0.8\lambda \quad (2.27)$$

$$L_{antena} = 0.8(0.05172m)$$

$$L_{antena} = 0.04138m = 41.38mm$$

La longitud de los elementos parásitos se describe a continuación:

$$l_{reflector} = 0.482\lambda \quad (2.28)$$

$$l_{reflector} = 0.482(0.05172m)$$

$$l_{reflector} = 0.02493m = 24.93mm$$

El número de directores a diseñar son 3, con los siguientes valores:

$$l_{1st\ director} = 0.428\lambda \quad (2.29)$$

$$l_{1st\ director} = 0.428(0.05172m)$$

$$l_{1st\ director} = 0.02214m = 22.14mm$$

$$l_{2nd\ director} = 0.424\lambda \quad (2.30)$$

$$l_{2nd\ director} = 0.424(0.05172m)$$

$$l_{2nd\ director} = 0.02193m = 21.93mm$$

$$l_{3rd\ director} = l_{1st\ director}$$

$$l_{3rd\ director} = 0.02214m = 22.14mm$$

### 2.2.1.3 Antena de longitud $1.20\lambda$

Con una antena de longitud  $1.20\lambda$  se tiene una ganancia de 10.2 dB en base a la Tabla 2.4, como en las longitudes anteriores tanto las ecuaciones (2.31), (2.32), (2.33) y (2.34) permiten el cálculo del tamaño de la antena y de los elementos parásitos.

$$L_{antena} = 1.20\lambda \quad (2.31)$$

$$L_{antena} = 1.20(0.05172m)$$

$$L_{antena} = 0.06206m = 62.06mm$$

La longitud del reflector se describe a continuación:

$$l_{reflector} = 0.482\lambda \quad (2.32)$$

$$l_{reflector} = 0.482(0.05172m)$$

$$l_{reflector} = 0.02493m = 24.93mm$$

Según la Tabla 2.4 para el tamaño y ganancia de la antena se requieren 4 elementos directores:

$$l_{1st\ director} = 0.428\lambda \quad (2.33)$$

$$l_{1st\ director} = 0.428(0.05172m)$$

$$l_{1st\ director} = 0.02214m = 22.14mm$$

$$l_{2nd\ director} = l_{3rd\ director}$$

$$l_{2nd\ director} = 0.420\lambda \quad (2.34)$$

$$l_{2nd\ director} = 0.420(0.05172m)$$

$$l_{2nd\ director} = 0.02172m = 21.72mm$$

$$l_{3er\ director} = 0.02172m = 21.72mm$$

$$l_{4th\ director} = l_{1st\ director}$$

$$l_{4th\ director} = 0.02214m = 22.14mm$$

#### 2.2.1.4 Antena de longitud $2.2\lambda$

Para el diseño de una antena de longitud  $2.2\lambda$  se tiene una ganancia de 12.25 dB [42].

Las ecuaciones (2.35) a la (2.41) permiten llevar a cabo los cálculos para determinar la longitud de la antena y de los elementos reflector y directores.

$$L_{antena} = 2.2\lambda \quad (2.35)$$

$$L_{antena} = 2.2(0.05172m)$$

$$L_{antena} = 0.11378m = 113.78mm$$

Cálculo de la longitud de los elementos parásitos:

$$l_{reflector} = 0.482\lambda \quad (2.36)$$

$$l_{reflector} = 0.482(0.05172m)$$

$$l_{reflector} = 0.02493m = 24.93mm$$

De acuerdo a la Tabla 2.4 para el tamaño de la antena y ganancia, el número de directores es 10:

$$l_{1st\ director} = 0.432\lambda \quad (2.37)$$

$$l_{1st\ director} = 0.432(0.05172m)$$

$$l_{1st\ director} = 0.02234m = 22.34mm$$

$$l_{2nd\ director} = 0.415\lambda \quad (2.38)$$

$$l_{2nd\ director} = 0.415(0.05172m)$$

$$l_{2nd\ director} = 0.02146m = 21.46mm$$

$$l_{3rd\ director} = 0.407\lambda \quad (2.39)$$

$$l_{3rd\ director} = 0.407(0.05172m)$$

$$l_{3rd\ director} = 0.02105m = 21.05mm$$

$$l_{4th\ director} = 0.398\lambda \quad (2.40)$$

$$l_{4th\ director} = 0.398(0.05172m)$$

$$l_{4th\ director} = 0.02058m = 20.58mm$$

$$l_{5th\ director} = l_{6th\ director} = l_{7th\ director} = l_{8th\ director}$$

$$l_{5th\ director} = 0.390\lambda \quad (2.41)$$

$$l_{5th\ director} = 0.390(0.05172m)$$

$$l_{5th\ director} = 0.02017m = 20.17mm$$

$$l_{6th\ director} = 0.02017m = 20.17mm$$

$$l_{7th\ director} = 0.02017m = 20.17mm$$

$$l_{8th\ director} = 0.02017m = 20.17mm$$

$$l_{9th\ director} = l_{4th\ director}$$

$$l_{9th\ director} = 0.02058m = 20.58mm$$

$$l_{10th\ director} = l_{3rd\ director}$$

$$l_{10th\ director} = 0.02105m = 21.05mm$$

### 2.2.1.5 Antena de longitud $3.2\lambda$

La antena de longitud  $3.2\lambda$  tiene una ganancia de 13.4, un elemento reflector y 15 directores en base a la Tabla 2.4, las ecuaciones (2.42) a la (2.50) permiten el cálculo de los elementos parásitos.

$$L_{antena} = 3.2\lambda \quad (2.42)$$

$$L_{antena} = 3.2(0.05172m)$$

$$L_{antena} = 0.16550m = 165.50mm$$

A continuación se procede a calcular la longitud del elemento reflector:

$$l_{reflector} = 0.482\lambda \quad (2.43)$$

$$l_{reflector} = 0.482(0.05172m)$$

$$l_{reflector} = 0.02493m = 24.93mm$$

El cálculo de los directores se muestra a continuación:

$$l_{1st\ director} = 0.428\lambda \quad (2.44)$$

$$l_{1st\ director} = 0.428(0.05172m)$$

$$l_{1st\ director} = 0.02214m = 22.14mm$$

$$l_{2nd\ director} = 0.420\lambda \quad (2.45)$$

$$l_{2nd\ director} = 0.420(0.05172m)$$

$$l_{2nd\ director} = 0.02172m = 21.72mm$$

$$l_{3rd\ director} = 0.407\lambda \quad (2.46)$$

$$l_{3rd\ director} = 0.407(0.05172m)$$

$$l_{3rd\ director} = 0.02105m = 21.05mm$$

$$l_{4th\ director} = 0.398\lambda \quad (2.47)$$

$$l_{4th\ director} = 0.398(0.05172m)$$

$$l_{4th\ director} = 0.02058m = 20.58mm$$

$$l_{5th\ director} = 0.394\lambda \quad (2.48)$$

$$l_{5th\ director} = 0.394(0.05172m)$$

$$l_{5th\ director} = 0.02038m = 20.38mm$$

$$l_{6th\ director} = 0.390\lambda \quad (2.49)$$

$$l_{6th\ director} = 0.390(0.05172m)$$

$$l_{6th\ director} = 0.02017m = 20.17mm$$

$$l_{7th\ director} = l_{8th\ director} = l_{9th\ director} = l_{10th\ director} = l_{11th\ director} = l_{12th\ director} \\ = l_{13th\ director} = l_{14th\ director} = l_{15th\ director}$$

$$l_{7th\ director} = 0.386\lambda \quad (2.50)$$

$$l_{7th\ director} = 0.386(0.05172m)$$

$$l_{7th\ director} = 0.01996m = 19.96mm$$

$$l_{8th\ director} = 0.01996m = 19.96mm$$

$$l_{9th\ director} = 0.01996m = 19.96mm$$

$$l_{10th\ director} = 0.01996m = 19.96mm$$

$$l_{11th\ director} = 0.01996m = 19.96mm$$

$$l_{12th\ director} = 0.01996m = 19.96mm$$

$$l_{13th\ director} = 0.01996m = 19.96mm$$

$$l_{14th\ director} = 0.01996m = 19.96mm$$

$$l_{15th\ director} = 0.01996m = 19.96mm$$

#### 2.2.1.6 Antena de longitud $4.2\lambda$

Finalmente se presenta el cálculo de los elementos parásitos para una antena de longitud  $4.2\lambda$  y una ganancia de 14.2 dB [42], las ecuaciones de la (2.51) a la ecuación (2.59) permite el cálculo del tamaño de la antena y la longitud de los elementos reflector y directores.

$$L_{antena} = 4.2\lambda \quad (2.51)$$

$$L_{antena} = 4.2(0.05172m)$$

$$L_{antena} = 0.21722m = 217.22mm$$

El cálculo del reflector y directores se describe a continuación en base a la Tabla 2.4:

$$l_{reflector} = 0.475\lambda \quad (2.52)$$

$$l_{reflector} = 0.475(0.05172m)$$

$$l_{reflector} = 0.02457m = 24.57mm$$

El número de directores necesarios para alcanzar dicha ganancia son 13 [42], con los siguientes valores:

$$l_{1st\ director} = l_{2nd\ director}$$

$$l_{1st\ director} = 0.424\lambda \quad (2.53)$$

$$l_{1st\ director} = 0.424(0.05172m)$$

$$l_{1st\ director} = 0.02193m = 21.93mm$$

$$l_{2nd\ director} = 0.02193m = 21.93mm$$

$$l_{3rd\ director} = 0.420\lambda \quad (2.54)$$

$$l_{3rd\ director} = 0.420(0.05172m)$$

$$l_{3rd\ director} = 0.02172m = 21.72mm$$

$$l_{4th\ director} = 0.407\lambda \quad (2.55)$$

$$l_{4th\ director} = 0.407(0.05172m)$$

$$l_{4th\ director} = 0.02105m = 21.05mm$$

$$l_{5th\ director} = 0.403\lambda \quad (2.56)$$

$$l_{5th\ director} = 0.403(0.05172m)$$

$$l_{5th\ director} = 0.02084m = 20.84mm$$

$$l_{6th\ director} = 0.398\lambda \quad (2.57)$$

$$l_{6th\ director} = 0.398(0.05172m)$$

$$l_{6th\ director} = 0.02058m = 20.58mm$$

$$l_{7th\ director} = 0.394\lambda \quad (2.58)$$

$$l_{7th\ director} = 0.394(0.05172m)$$

$$l_{7th\ director} = 0.02038m = 20.38mm$$

$$l_{8th\ director} = l_{9th\ director} = l_{10th\ director} = l_{11th\ director} = l_{12th\ director} = l_{13th\ director}$$

$$l_{8th\ director} = 0.390\lambda \quad (2.59)$$

$$l_{8th\ director} = 0.390(0.05172m)$$

$$l_{8th\ director} = 0.02017m = 20.17mm$$

$$l_{9th\ director} = 0.02017m = 20.17mm$$

$$l_{10th\ director} = 0.02017m = 20.17mm$$

$$l_{11th\ director} = 0.02017m = 20.17mm$$

$$l_{12th\ director} = 0.02017m = 20.17mm$$

$$l_{13th\ director} = 0.02017m = 20.17mm$$

## 2.3 DISEÑO MEDIANTE UNA CALCULADORA YAGI

El segundo método de diseño se basa en el uso de ecuaciones del programa de calculadora para diseño de antenas Yagi que se encuentra disponible en línea [43], este software fue creado para el diseño de antenas Yagi que no son del tipo microstrip, las ecuaciones que se obtuvieron del programa son descritas a continuación:

### 2.3.1 LONGITUD DE ONDA

$$\lambda = \frac{299800000\ m/s}{f} \quad (2.60)$$

$$\lambda = \frac{299800000 \text{ m/s}}{5800 \text{ MHz}}$$

$$\lambda = 5.17 \text{ cm}$$

### 2.3.2 LONGITUD DEL REFLECTOR

$$L_R = 0.42983044 * \lambda + \text{Thru Boom Correction} \quad (2.61)$$

Como la antena a diseñarse es una antena microstrip no posee el elemento boom<sup>5</sup> por lo que este dato no se toma en consideración.

$$L_R = 0.42983044 * 51.724 \text{ mm}$$

$$L_R = 22.233 \text{ mm}$$

### 2.3.3 ESPACIAMIENTO DEL REFLECTOR

En base a la ecuación (2.62) se procede al cálculo del espaciamiento entre el elemento reflector y el elemento conductor.

$$S_R = 0.24 * \lambda \quad (2.62)$$

$$S_R = 0.24 * 51.724 \text{ mm}$$

$$S_R = 12.414 \text{ mm}$$

### 2.3.4 LONGITUD DEL DIRECTOR

Se procede a calcular la longitud del elemento director con el uso de la ecuación (2.63) que se obtuvo de la calculadora Yagi.

$$L_{DIR} = \left( (e^{-0.075857 * \# \text{ de director} * A} + B + C) * \lambda \right) \quad (2.63)$$

Donde:

$$A = \left( \left( \frac{\text{Diámetro del elemento} * 0.1}{\lambda} \right)^{0.1996231} * 0.1793871 + 0.0073443 \right)$$

---

<sup>5</sup> Sección horizontal entre los elementos de una antena Yagi.

$$B = \left( \frac{\text{Diámetro del elemento} * 0.1}{\lambda} \right)^{0.2078146} * -0.4327718$$

$$C = 0.51793$$

Es necesario decir que como en este caso se cuenta con una antena microstrip, no se puede hablar de un diámetro del director sino más bien de un grosor de lámina por lo que se tomará este valor para los cálculos siguientes:

$$A = \left( \left( \frac{1,558 \text{ mm} * 0.1}{5.17 \text{ cm}} \right)^{0.1996231} * 0.1793871 + 0.0073443 \right)$$

$$A = 0.09651$$

$$B = \left( \frac{1,558 \text{ mm} * 0.1}{5,17 \text{ cm}} \right)^{0.2078146} * -0.4327718$$

$$B = -0.209021$$

A continuación se realizará el cálculo de la longitud de los directores en base a la ecuación (2.63).

$$L_{D_1} = \left( (e^{-0.075857 * \# \text{ de director}} * A) + B + C \right) * \lambda$$

$$L_{D_1} = \left( (e^{-0.075857 * 1} * 0.09651) + -0.209021 + 0.51793 \right) * 5.17 \text{ cm}$$

$$L_{D_1} = 2.0596 \text{ cm} \approx 21 \text{ mm}$$

$$L_{D_2} = \left( (e^{-0.075857 * \# \text{ de director}} * A) + B + C \right) * \lambda$$

$$L_{D_2} = \left( (e^{-0.075857 * 2} * 0.09651) + -0.209021 + 0.51793 \right) * 5.17 \text{ cm}$$

$$L_{D_2} = 2.0195 \text{ cm} \approx 20 \text{ mm}$$

$$L_{D_3} = \left( (e^{-0.075857 * \# \text{ de director}} * A) + B + C \right) * \lambda$$

$$L_{D_3} = \left( (e^{-0.075857 * 3} * 0.09651) + -0.209021 + 0.51793 \right) * 5.17 \text{ cm}$$

$$L_{D_3} = 1.9945 \text{ cm} \approx 20 \text{ mm}$$

$$L_{D_4} = \left( \left( e^{-0.075857 * \# \text{ de director} * A} + B + C \right) * \lambda \right)$$

$$L_{D_4} = \left( \left( e^{-0.075857 * 4 * 0.09651} + -0.209021 + 0.51793 \right) * 5.17 \text{ cm} \right)$$

$$L_{D_4} = 1.9654 \text{ cm} \approx 20 \text{ mm}$$

### 2.3.5 ESPACIAMIENTO ENTRE DIRECTORES

Para obtener el espaciamiento entre elementos directores se multiplica el valor de longitud de onda por una constante diferente para cada director, estos valores se muestran en la Tabla 2.5.

**Tabla 2. 5** Espaciamiento entre elementos Directores [43]

|       |       | $S_{D_n} = D_n * \lambda$ | $S_{D_n} [\text{cm}]$ |
|-------|-------|---------------------------|-----------------------|
| $D_1$ | 0.075 | $S_{D_1}$                 | 0.4                   |
| $D_2$ | 0.18  | $S_{D_2}$                 | 0.9                   |
| $D_3$ | 0.215 | $S_{D_3}$                 | 1.1                   |
| $D_4$ | 0.25  | $S_{D_4}$                 | 1.3                   |
| $D_5$ | 0.28  | $S_{D_5}$                 | 1.4                   |
| $D_6$ | 0.3   | $S_{D_6}$                 | 1.6                   |
| $D_7$ | 0.315 | $S_{D_7}$                 | 1.6                   |
| $D_8$ | 0.33  | $S_{D_8}$                 | 1.7                   |
| $D_9$ | 0.345 | $S_{D_9}$                 | 1.8                   |

### 2.3.6 GANANCIA

Para el cálculo de la ganancia se estima la longitud de la antena después de haber incorporado un elemento director, es decir se toma en consideración la distancia de separación entre el reflector y el elemento radiante, y entre el conductor y los directores y se suman ambas distancias.

La ecuación (2.64) permite calcular la longitud de la antena.

$$L_{a_n} = L_{a_{n-1}} + S_{D_n} \quad (2.64)$$

Donde:

$L_{a_n}$  = Longitud de la antena con n elementos directores

$L_{a_{n-1}}$  = Longitud de la antena con n-1 elementos directores

$S_{D_n}$  = Espaciamiento del último elemento director

Para el cálculo de la ganancia de la antena se tiene la ecuación (2.65) descrita a continuación:

$$G_n = 7.8 * \log \frac{L_{a_n}}{\lambda} + 9.2 [dB] \quad (2.65)$$

Donde:

$G_n$  = Ganancia de la antena con n elementos directores

$L_{a_n}$  = Longitud de la antena con n elementos directores

A continuación se procede a calcular la ganancia de varias longitudes de antena, en donde varía el número de directores.

Previo al cálculo de la ganancia con un elemento director se debe obtener primero la longitud de la antena:

$$G_1 = 7.8 * \log \frac{L_{a_1}}{\lambda} + 9.2 [dB]$$

$$L_{a_1} = S_R + S_{D_1}$$

$$L_{a_1} = 12.414 \text{ mm} + 4 \text{ mm}$$

$$L_{a_1} = 16.414 \text{ mm}$$

$$G_1 = 7.8 * \log \frac{16.414 \text{ mm}}{5.17 \text{ cm}} + 9.2 [dB]$$

$$G_1 = 5.3134 [dB]$$

La ganancia de la antena con dos elementos directores se describe a continuación:

$$G_2 = 7.8 * \log \frac{L_{a_2}}{\lambda} + 9.2 [dB]$$

$$L_{a_2} = L_{a_1} + S_{D_2}$$

$$L_{a_2} = 16.414 \text{ mm} + 9 \text{ mm}$$

$$L_{a_2} = 25.414 \text{ mm}$$

$$G_2 = 7.8 * \log \frac{25.414 \text{ mm}}{5.17 \text{ cm}} + 9.2 [dB]$$

$$G_2 = 6.7943 [dB]$$

Al aumentar un director más el cálculo de la ganancia de la antena es el siguiente:

$$G_3 = 7.8 * \log \frac{L_{a_3}}{\lambda} + 9.2 [dB]$$

$$L_{a_3} = L_{a_2} + S_{D_3}$$

$$L_{a_3} = 25.414 \text{ mm} + 11 \text{ mm}$$

$$L_{a_3} = 36.414 \text{ mm}$$

$$G_3 = 7.8 * \log \frac{36.414 \text{ mm}}{5.17 \text{ cm}} + 9.2 [dB]$$

$$G_3 = 8.0127 [dB]$$

Los cálculos para determinar la longitud y ganancia de la antena con 4 elementos directores:

$$G_4 = 7.8 * \log \frac{L_{a_4}}{\lambda} + 9.2 [dB]$$

$$L_{a_4} = L_{a_3} + S_{D_4}$$

$$L_{a_4} = 36.414 \text{ mm} + 13 \text{ mm}$$

$$L_{a_4} = 49.414 \text{ mm}$$

$$G_4 = 7.8 * \log \frac{49.414 \text{ mm}}{5.17 \text{ cm}} + 9.2 \text{ [dB]}$$

$$G_4 = 9.0468 \text{ [dB]}$$

Usando las fórmulas de la calculadora Yagi y una frecuencia central de 5.8 GHz los valores obtenidos se presentan en la Tabla 2.6:

**Tabla 2. 6** Valores de Ganancia obtenidos mediante el método de ecuaciones de una calculadora Yagi

| <b>No. Director</b> | <b>Longitud (mm)</b> | <b>Espaciamiento(mm)</b> | <b>Ganancia (dB)</b> |
|---------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|
| <b>1</b>            | 21                   | 4                        | 5.3                  |
| <b>2</b>            | 20                   | 9                        | 6.8                  |
| <b>3</b>            | 20                   | 11                       | 8.0                  |
| <b>4</b>            | 20                   | 13                       | 9.1                  |

## **CAPÍTULO III**

### **SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN**

En este capítulo se realizará la simulación de la antena diseñada en el capítulo anterior, para lo cual se seleccionará un software que permita obtener los parámetros de la antena deseados.

En base a los resultados que se obtengan se seleccionará el tipo de sustrato y el método de diseño que brinde mejores características a la antena.

#### **3.1 SELECCIÓN DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN**

##### **3.1.1 ADS (*ADVANCED DESIGN SYSTEM*, SISTEMA DE DISEÑO AVANZADO)**

ADS es un software de automatización de diseño electrónico para trabajar en Radio Frecuencia RF, microondas y aplicaciones digitales de alta velocidad, cuenta con una interfaz de fácil manejo.

ADS permite simular circuitos desde el dominio de la frecuencia y del tiempo hasta en el campo electromagnético [44].

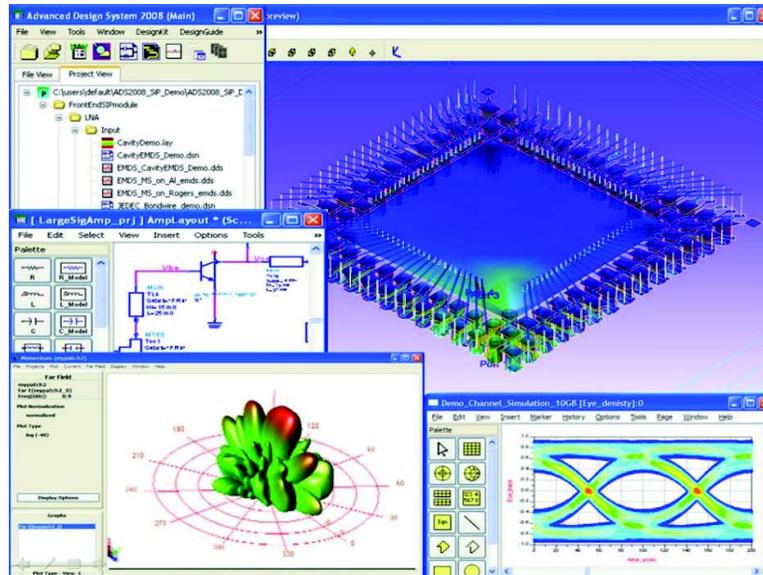
Entre las ventajas de este software se enlistan las siguientes:

- Es preciso, rápido y fácil de usar.
- La interfaz es amigable para el usuario.
- Se presenta un simulador en el dominio de la frecuencia que permite visualizar los parámetros S.
- Se cuenta con modelamiento y simulación 3D.

ADS dispone de dos ventanas, una en la que se visualiza el circuito, es decir el diseño esquemático y las simulaciones, y una segunda en la que se observa como se ve el circuito sobre la placa.

Este software reduce el tiempo de simulación debido a que permite realizar varias simulaciones a la vez, el entorno de trabajo del ADS se muestra en la Figura 3.1,

se observa como simultáneamente se puede trabajar viendo simulaciones en 3D, el diseño esquemático, el circuito en la placa entre otros valores [44].



**Figura 3. 1** Espacio de Trabajo ADS [45]

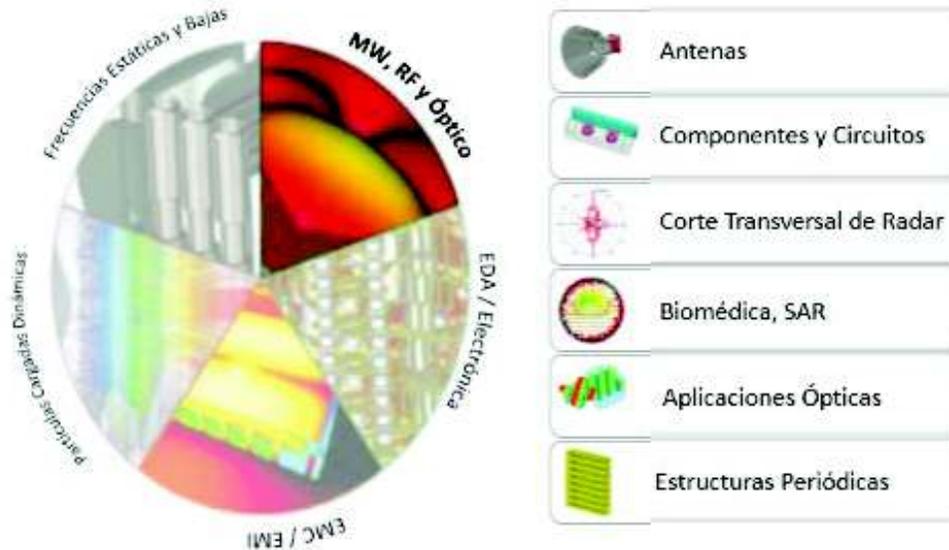
### 3.1.2 CST (COMPUTER SIMULATION TECHNOLOGY, TECNOLOGÍA DE SIMULACIÓN COMPUTARIZADA)

CST es un software para simulación electromagnética, con una interfaz amigable para el usuario con simulación en 3 dimensiones capaz de elegir el método más apropiado para el diseño y optimización de dispositivos operando a determinada frecuencia [38].

Las herramientas que posee CST permiten el diseño y optimización de dispositivos que operan en un amplio rango de frecuencias, las herramientas de simulación son usadas para diferentes aplicaciones como acopladores, filtros, conectores, antenas, guías de onda, sensores, motores, actuadores entre otros [46], los beneficios que presenta este software se citan a continuación:

- Entorno de diseño integrado, facilitando el manejo de sistemas electromagnéticos completos.
- Ciclos de desarrollo cortos, prototipo virtual y optimización de diseño.

En la Figura 3.2 se indica las diferentes áreas en las que el simulador trabaja y el campo específico en el que se va a trabajar.



**Figura 3. 2** Áreas de Aplicación de CST [38]

### 3.1.3 FEKO

FEKO es una herramienta de simulación electromagnética integral para análisis de electromagnético de estructuras 3D, que basa su diseño sobre las ecuaciones de Maxwell, es adecuado para el análisis de antenas, circuitos microstrip y sistemas biomédicos acortando el tiempo de simulación con el uso de tablas de interpolación [47].

Se puede resaltar las siguientes características del software:

- Múltiples soluciones bajo una licencia única.
- Rápida simulación a través de procesos paralelos.
- Procesos de Optimización mediante el uso de algoritmos.
- Cuenta con métodos numéricos que pueden ser usados separados o simultáneamente usando hibridación logrando una solución eficiente [48].

A continuación se presenta el espacio de simulación que presenta el software FEKO en la Figura 3.3.

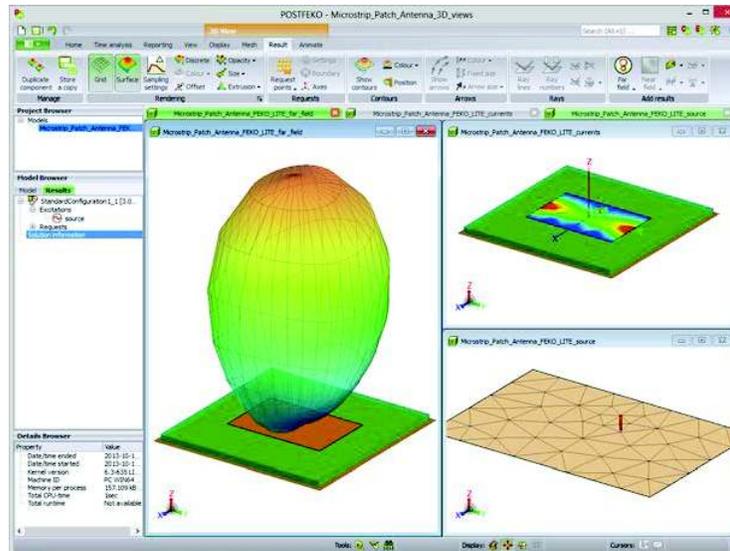


Figura 3. 3 Espacio de Trabajo FEKO [47]

Después de ver las características de los tres programas mencionados anteriormente se decide utilizar el software de diseño CST, ya que brinda un entorno amigable, de fácil uso y que permite mostrar claramente los parámetros de la antena de interés, además de ser uno de los softwares más completos en cuanto a análisis de parámetros de antenas. Es necesario decir que debido al costo elevado del software se procedió a llevar a cabo la simulación en una versión de prueba.

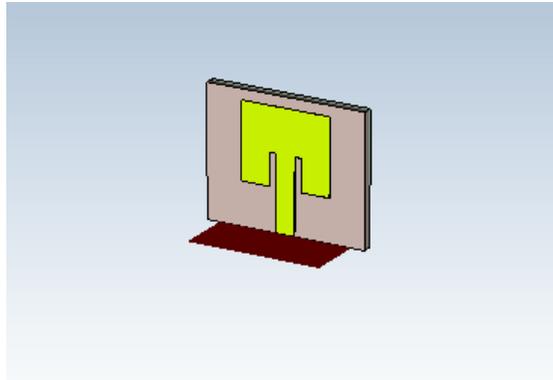
## 3.2 SIMULACIÓN DEL ELEMENTO RADIANTE CON LOS TRES TIPOS DE SUSTRATO

En base a los cálculos de diseño del elemento radiante de los tres tipos de sustrato que se detallaron en el capítulo 2, se procede a simular el diseño de la antena Yagi microstrip.

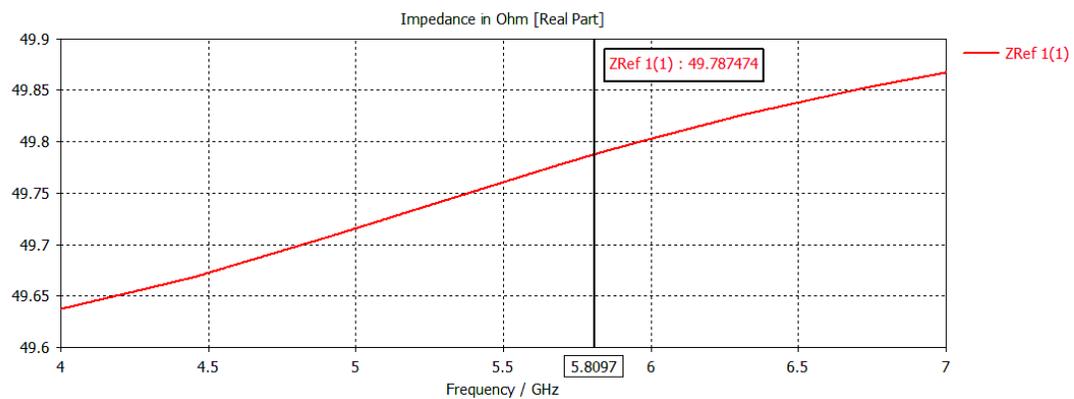
### 3.2.1 FR-4

El diseño del elemento conductor en el sustrato FR-4 mostrado en la Figura 3.4 resuena a una frecuencia de 5.8 GHz y tiene un VSWR de 1.5603 que si bien no es un acoplamiento perfecto pero se encuentra dentro del rango permitido de

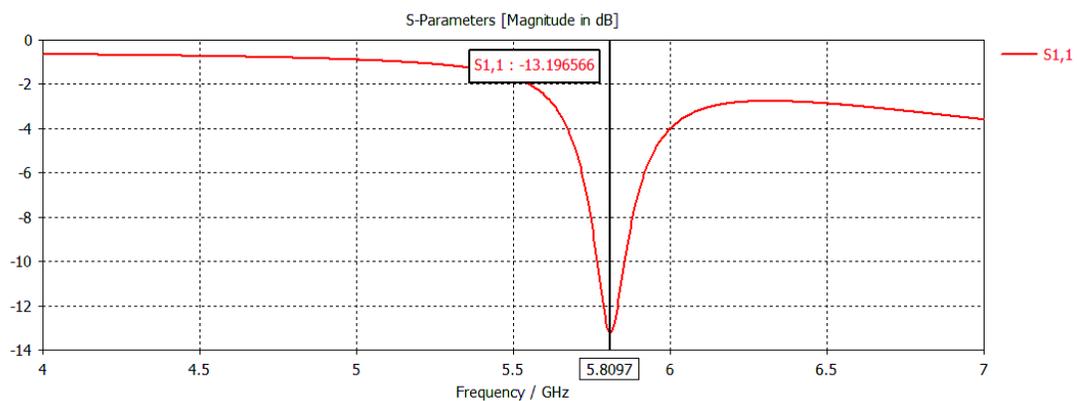
VSWR, mostrados en las Figuras 3.6 y 3.7 respectivamente, la Figura 3.5 representa la impedancia obtenida a la salida de la antena.



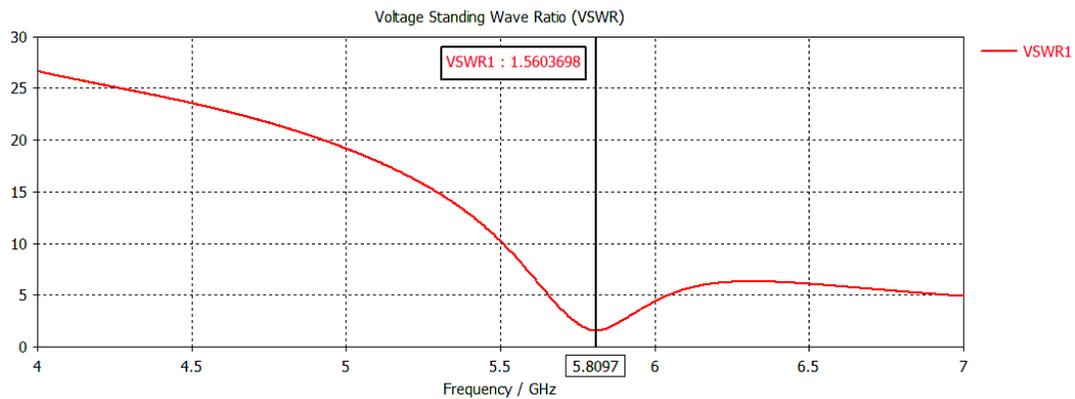
**Figura 3. 4** Diseño del elemento conductor con el sustrato FR-4



**Figura 3. 5** Impedancia de salida a 5.8 Ghz con el sustrato FR-4

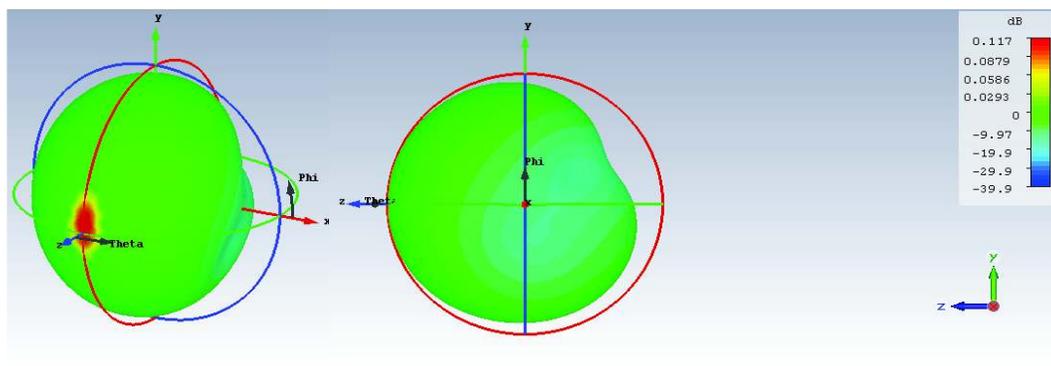


**Figura 3. 6** Frecuencia de resonancia de la antena, 5.8 GHz

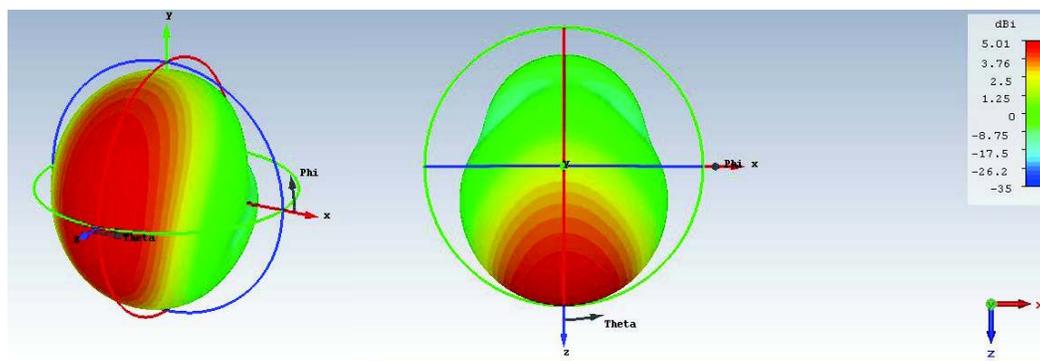


**Figura 3. 7** Relación de acoplamiento de la antena con el medio de transmisión

El lóbulo de radiación que presenta la antena en la Figura 3.8 muestra la ganancia obtenida en el elemento conductor, este valor es muy bajo, debido a que la línea de transmisión no absorbió toda la potencia, en la Figura 3.9 se representa la directividad de la antena a la frecuencia de 5.8 GHz.



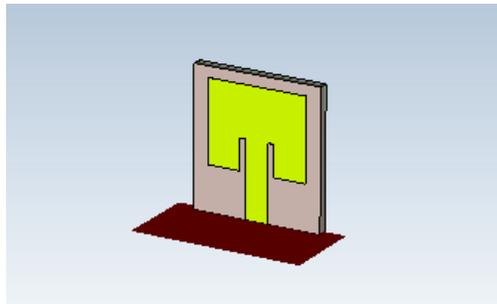
**Figura 3. 8** Ganancia del elemento conductor con el sustrato FR-4



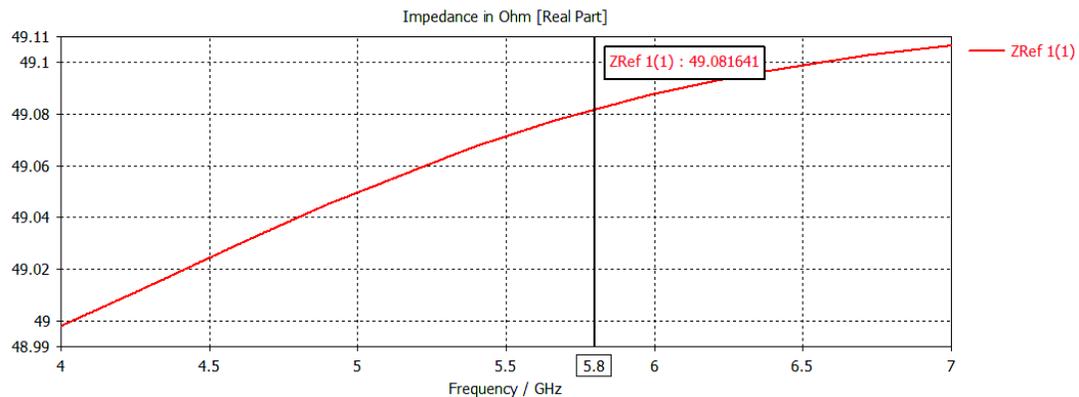
**Figura 3. 9** Directividad del elemento conductor con el sustrato FR-4

### 3.2.2 RO4003c

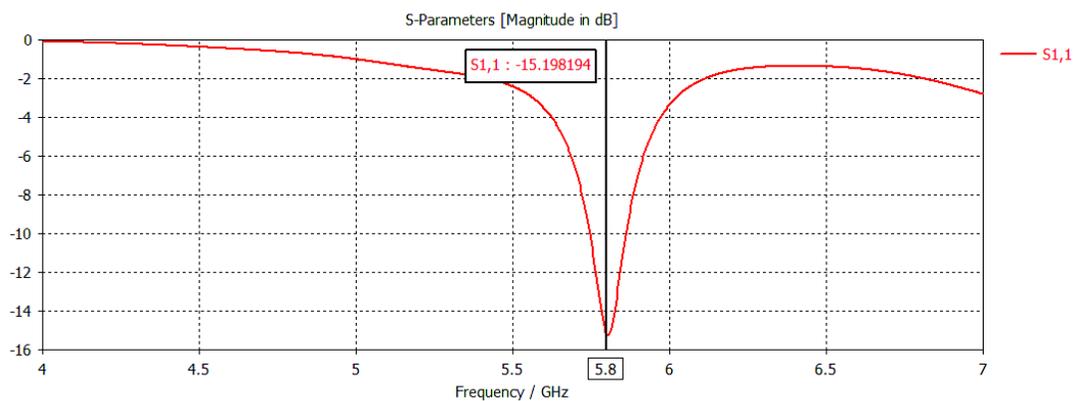
En la simulación del elemento radiante en el sustrato RO4003c mostrado en la Figura 3.10, la antena resuena a una frecuencia de 5.8 GHz, y presenta un VSWR de 1.4208 mostrado en la Figura 3.12, en donde se evidencia que la antena presenta un mejor acople en comparación a la antena diseñada en FR-4, la Figura 3.11 representa la impedancia de la antena con un valor cercano a  $50\Omega$ .



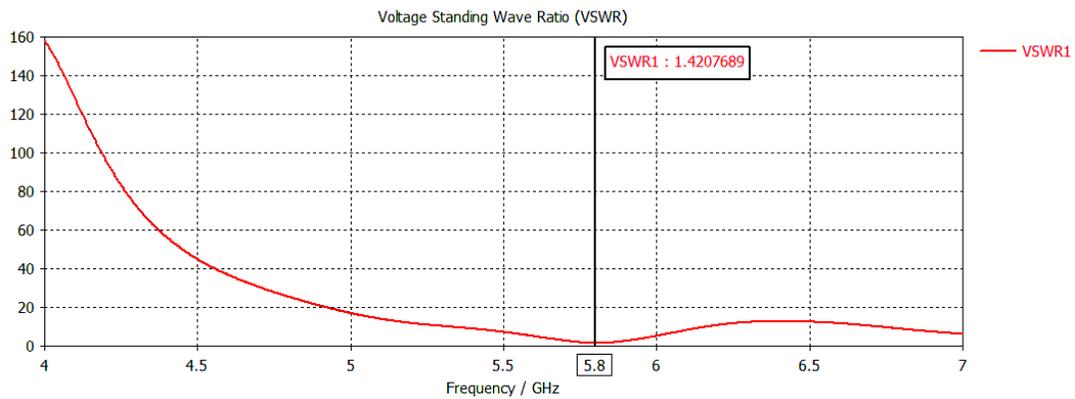
**Figura 3. 10** Diseño del elemento conductor con el sustrato RO4003c



**Figura 3. 11** Impedancia de salida de la antena

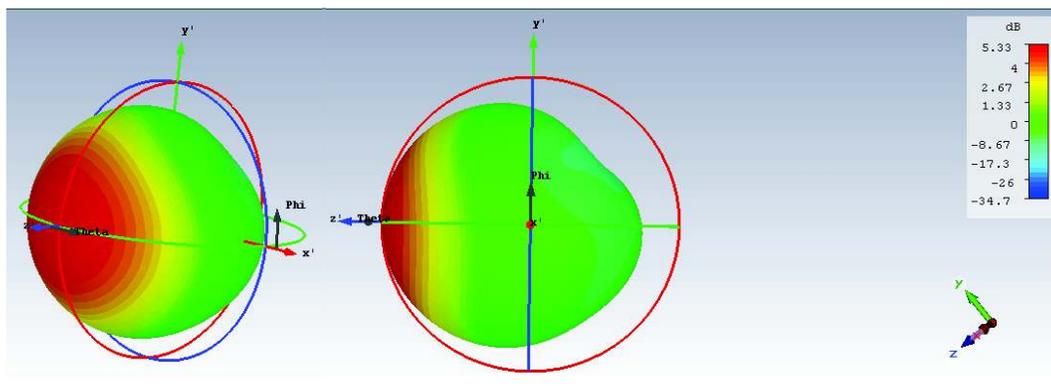


**Figura 3. 12** Frecuencia de resonancia con el sustrato RO4003c

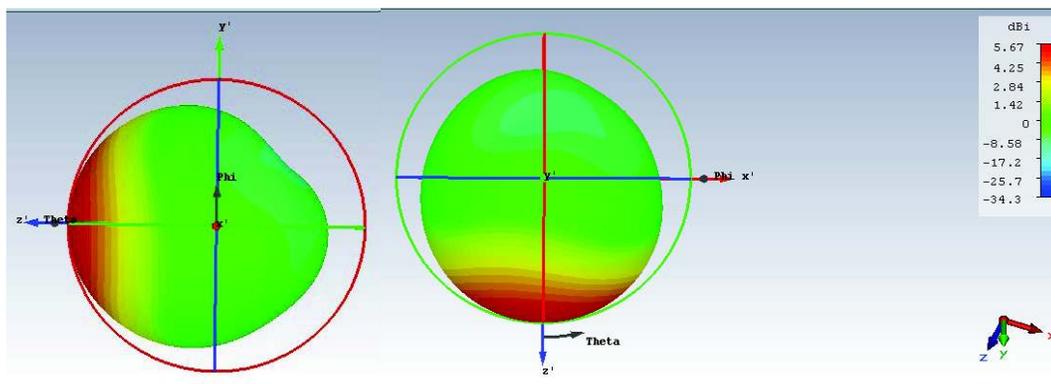


**Figura 3. 13** Relación de acoplamiento con la impedancia de entrada

La Figura 3.14 muestra la ganancia obtenida en el elemento conductor, el valor obtenido es muy bueno ya que el coeficiente de reflexión es menor en comparación con el sustrato anterior, la directividad de la antenna a la frecuencia de 5.8 GHz se representa en la Figura 3.15.



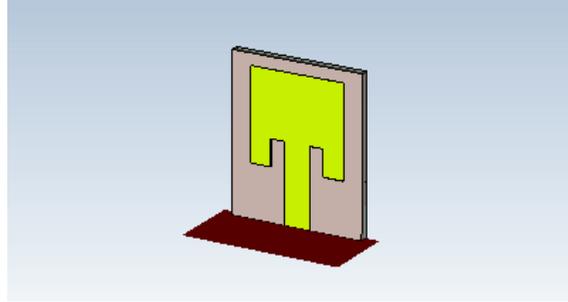
**Figura 3. 14** Ganancia de la antenna a la frecuencia de 5.8 GHz en el sustrato RO4003c



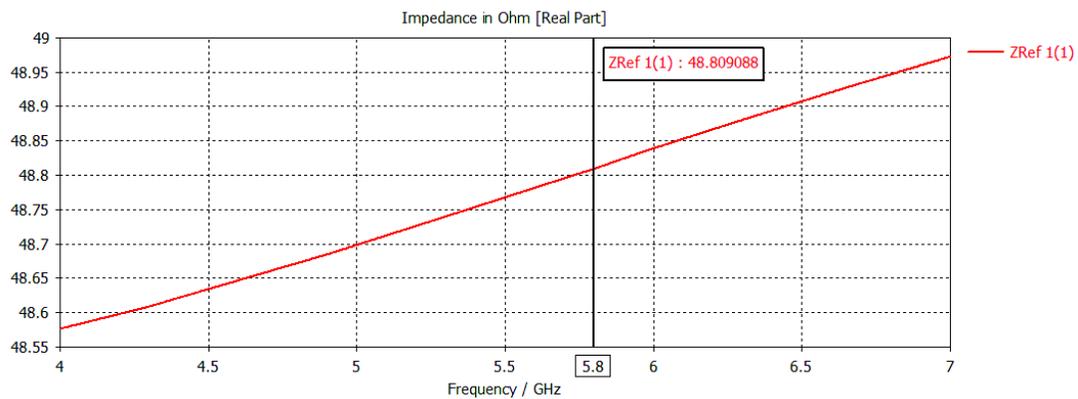
**Figura 3. 15** Directividad de la antenna a la frecuencia de 5.8 GHz en el sustrato RO4003c

### 3.2.3 RO5880

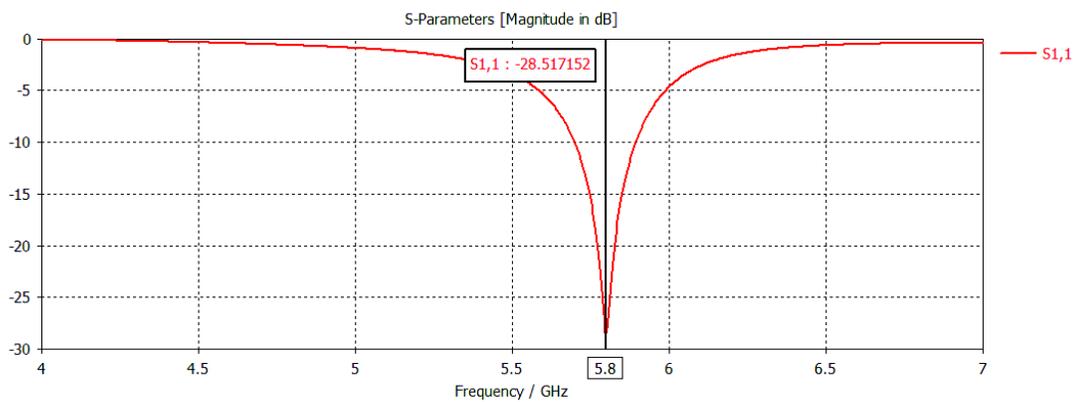
El diseño del elemento radiante en el sustrato RO5880 se muestra en la Figura 3.16, la antena resuena en la frecuencia de 5.8 GHz, y presenta un VSWR de 1.0768 que significa un excelente acople mostrado en la Figura 3.19, la Figura 3.17 representa la impedancia de la antena.



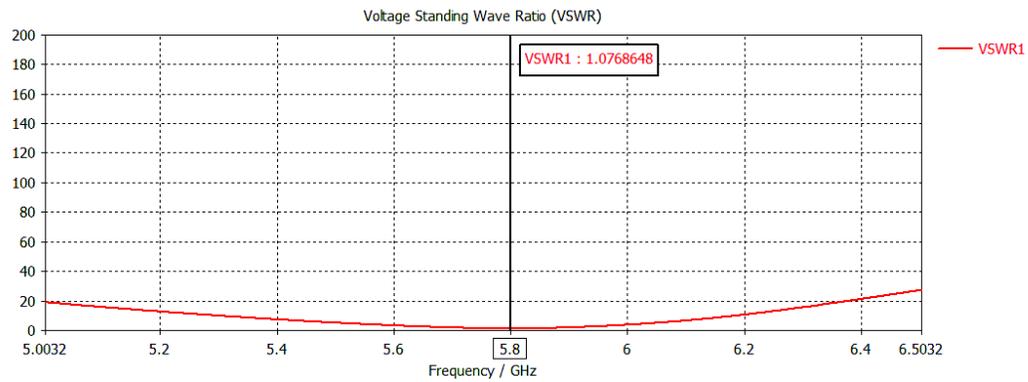
**Figura 3. 16** Diseño del elemento conductor con el sustrato RO5880



**Figura 3. 17** Impedancia a la salida de la antena

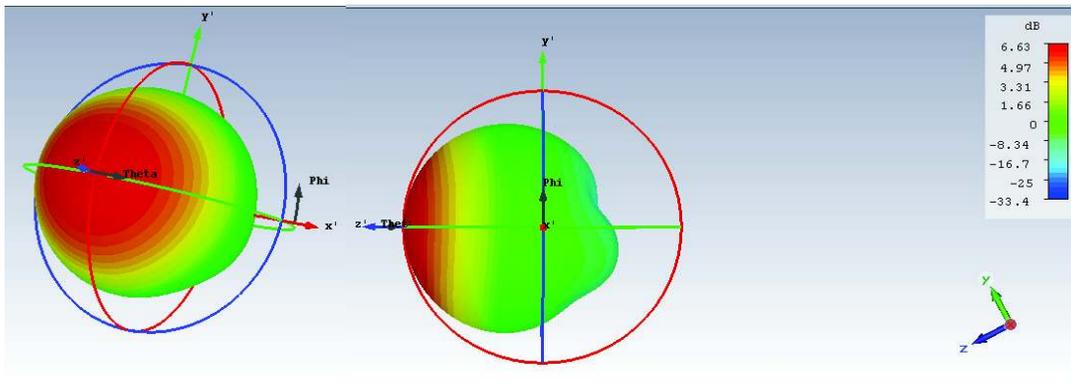


**Figura 3. 18** Frecuencia de resonancia con el sustrato RO5880

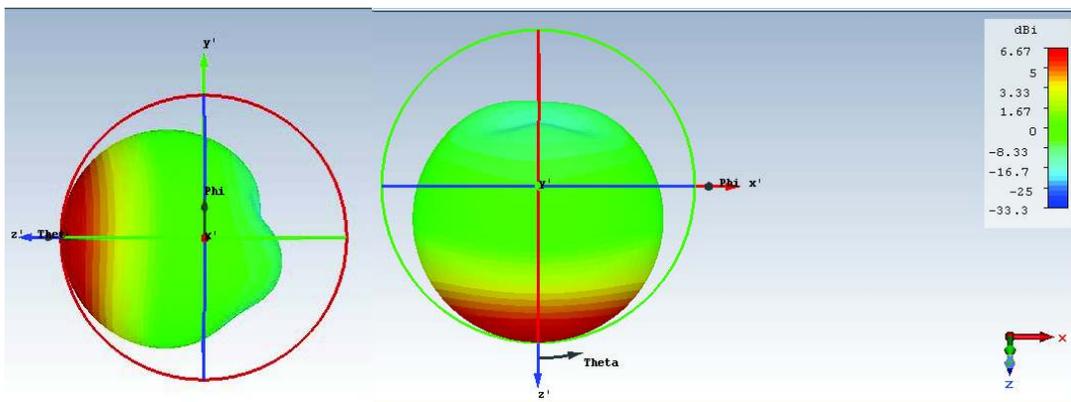


**Figura 3. 19** Relación de acoplamiento con la impedancia de entrada

La Figura 3.20 muestra la ganancia obtenida en el elemento conductor, presenta un valor de ganancia excelente ya que las pérdidas por retorno son menores en relación a los dos sustratos tratados, la directividad de la antenna a la frecuencia de 5.8 GHz se representa en la Figura 3.21 siendo más directiva con este sustrato.



**Figura 3. 20** Ganancia de la antenna a la frecuencia de 5.8 GHz en el sustrato RO5880



**Figura 3. 21** Directividad de la antenna a la frecuencia de 5.8 GHz en el sustrato RO5880

Los resultados obtenidos en las tres simulaciones se presentan en la Tabla 3.1, en la misma se compara los parámetros más importantes de la antena.

**Tabla 3. 1** Tabla comparativa de los parámetros de los diferentes sustratos

| Parámetros                | Sustratos |           |             |
|---------------------------|-----------|-----------|-------------|
|                           | FR-4      | RO4003c   | RO5880      |
| Ganancia                  | 0.117 dB  | 5.33 dB   | 6.63 dB     |
| Directividad              | 5.01 dBi  | 5.67 dBi  | 6.67 dBi    |
| Coefficiente de Reflexión | -13.59 dB | -14.35 dB | -28.6336 dB |
| VSWR                      | 1.5284    | 1.4735    | 1.0768      |

De los tres sustratos, FR-4, RO4003c y RO5880, el material que mejores resultados presenta es el sustrato RO5880 mayor ganancia y directividad, pero por precios se eligió el sustrato RO4003c del cual se obtuvo también buenos resultados, alta ganancia, directividad y es más conveniente en costos de fabricación.

Una vez que el sustrato ha sido seleccionado se procede a diseñar la antena Yagi con el aumento de elementos directores por ambos métodos de tabla y por ecuaciones matemáticas de una calculadora Yagi.

### 3.3 SIMULACIÓN DE LA ANTENA YAGI

Una vez diseñado el elemento radiante se colocan los directores uno tras otro, con el fin de observar el comportamiento de la antena cada vez que se aumentan elementos.

En primera instancia se dispuso los elementos parásitos (directores y reflector) a la misma altura con respecto a la base de la antena, mientras se estaba simulando se notó que al aumentar directores el lóbulo de radiación se distorsionaba y por ende la ganancia y directividad no variaban mucho; y, las pérdidas eran mayores, por lo que se colocó los elementos uno más arriba que otro, con lo que se mejoró el lóbulo de radiación, aumentó significativamente la ganancia y directividad; y como se esperaba, disminuyeron las pérdidas.

### 3.3.1 MÉTODO POR TABLAS

#### 3.3.1.1 Un elemento director

Se dispone de dos elementos parásitos ubicados al frente del conductor (elemento director) y uno en la parte de atrás (elemento reflector) separados entre ellos  $0.2\lambda$ . Como se muestra en la Figura 3.22 los elementos parásitos permitirán aumentar la ganancia y directividad de la antena, y a la vez, impedir que se expanda la energía por otros sectores.

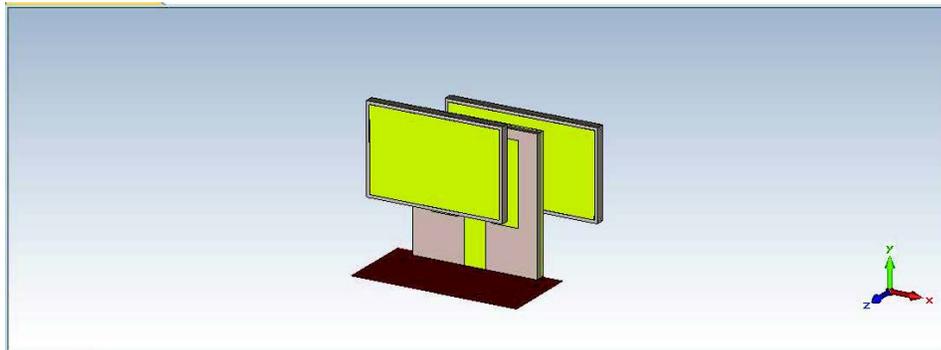


Figura 3. 22 Antena Yagi con un director

En el resultado de la simulación, la gráfica de parámetros S permite observar que la antena resuena a la frecuencia de 5.8 GHz con un coeficiente de reflexión de aproximadamente -11dB, en la Figura 3.23 se observa lo antes mencionado.

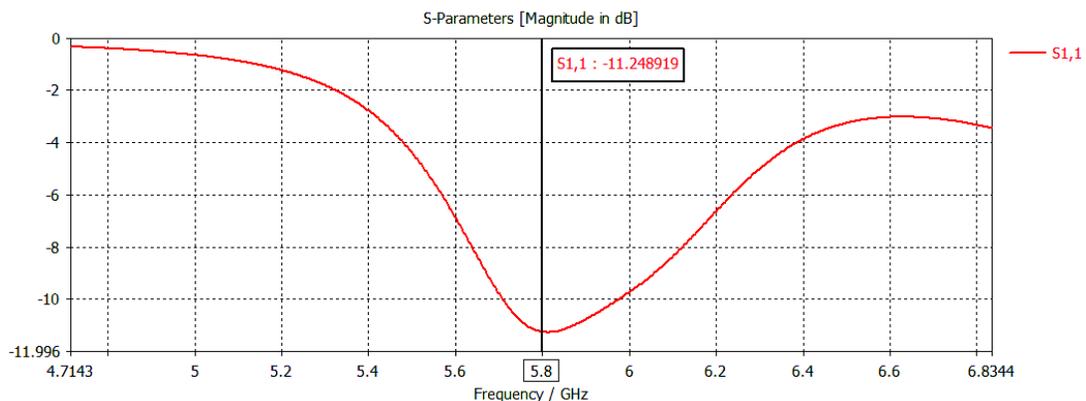
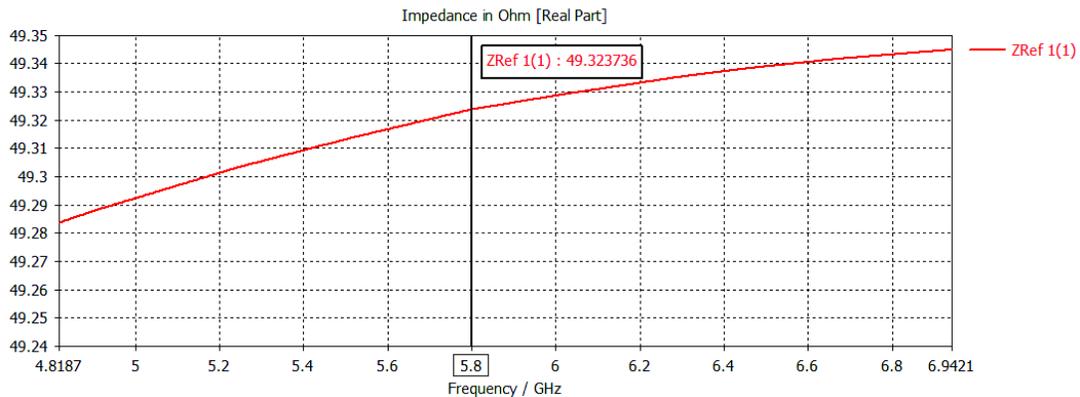
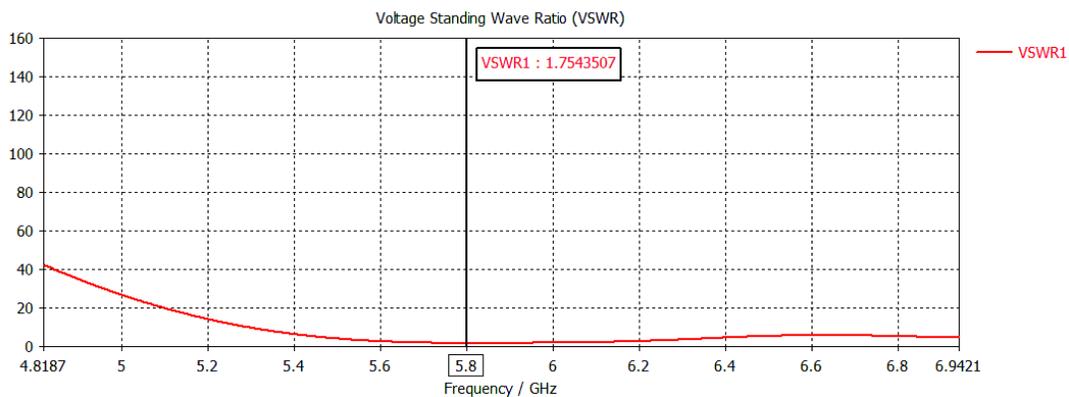


Figura 3. 23 Parámetros S con un elemento director

La impedancia que se obtiene de la antena es de aproximadamente  $50\Omega$  lo que se muestra en la Figura 3.24 y un VSWR de 1.754 que es un valor aceptable dentro del rango de acoplamiento de la línea de trasmisión a la antena, ver Figura 3.25.

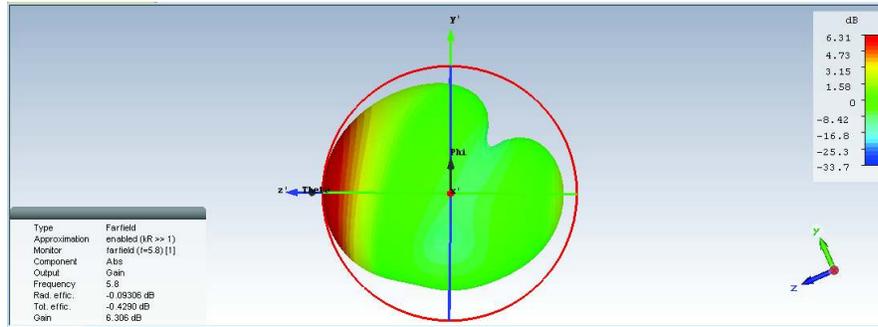


**Figura 3. 24** Impedancia característica a la frecuencia de 5.8 GHz

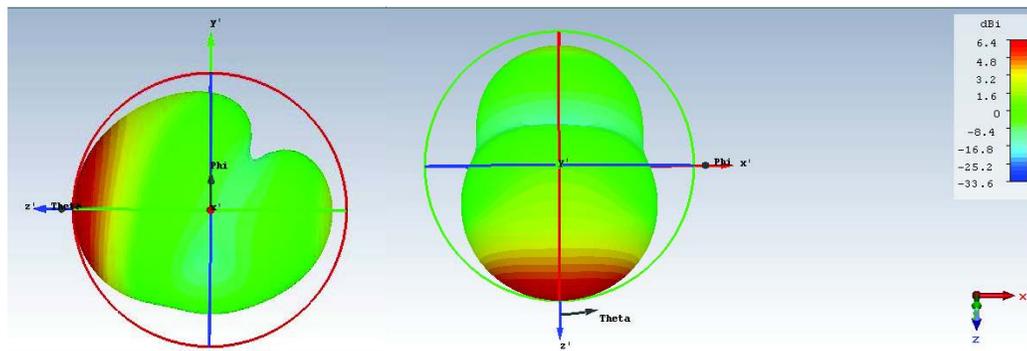


**Figura 3. 25** VSWR a la frecuencia de 5.8 GHz

La ganancia y directividad indicadas en las Figuras 3.26 y 3.27 respectivamente muestran un incremento comparado al medido sin elementos parásitos, incrementando la ganancia de 5.33dB a 6.31dB y la directividad de 5.67dBi a 6.4dBi, con lo que se concluye que efectivamente al aumentar un elemento director y un elemento reflector la antena es más directiva e incrementa su ganancia.



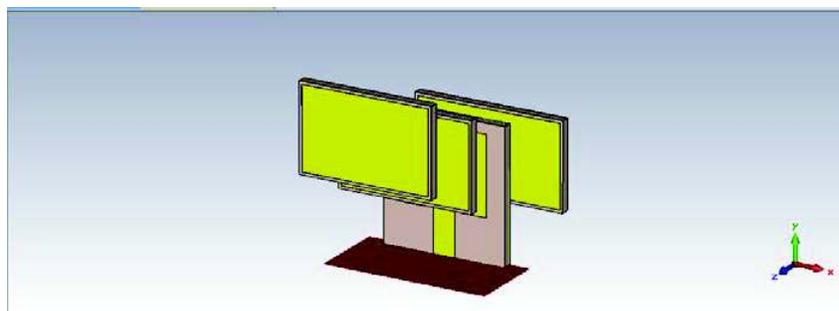
**Figura 3. 26** Ganancia de la antena con un director a 5.8 GHz



**Figura 3. 27** Directividad de la antena con un director a 5.8 GHz

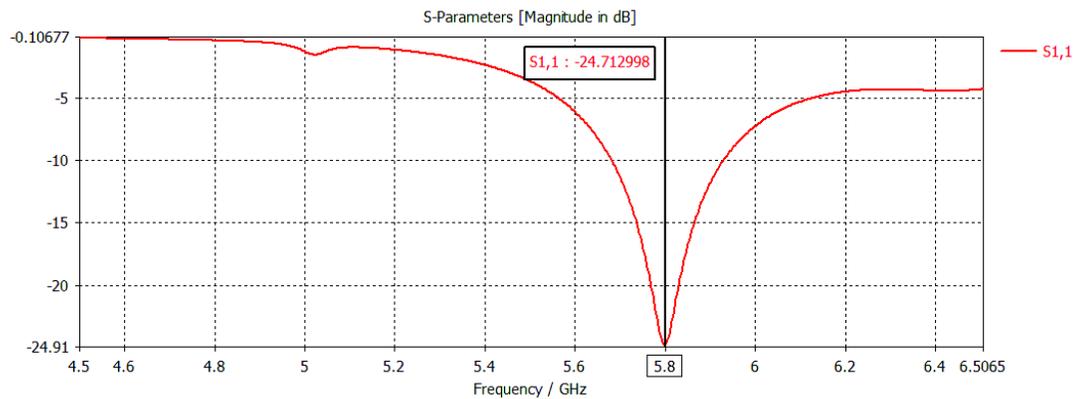
### 3.3.1.2 Dos elementos directores

Luego de observar los resultados al aumentar elementos parásitos al elemento conductor, se aumenta un director más a una distancia de  $0.2\lambda$  del primer elemento director como se observa en la Figura 3.28.



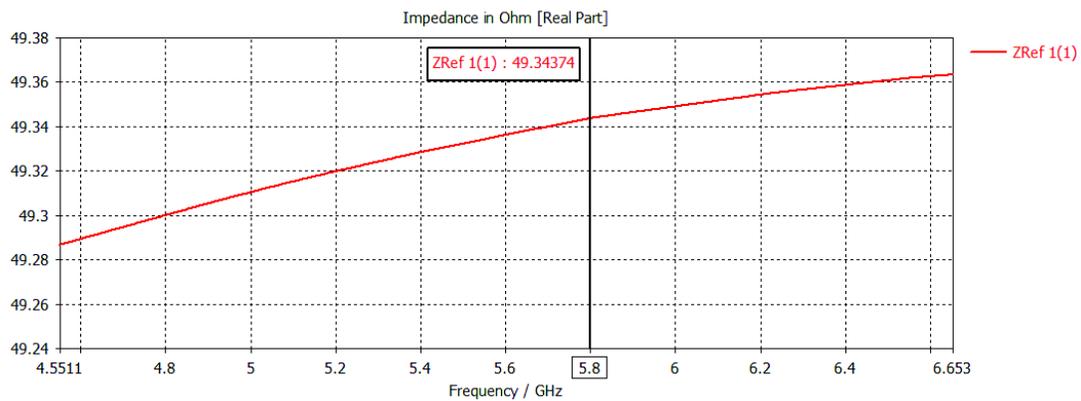
**Figura 3. 28** Antena Yagi con dos directores

En comparación a la antena con un elemento director, la curva de resonancia es más cerrada, es decir más exacta en 5.8 GHz, y el coeficiente de reflexión con un valor de -24.713 dB como se muestra en la Figura 3.29.

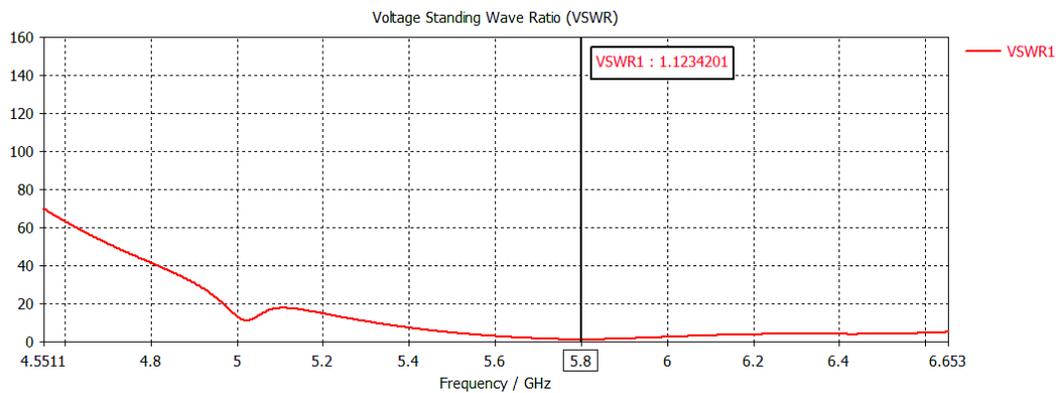


**Figura 3. 29** Parámetros S con dos elementos directores

Al aumentar un director más el valor de impedancia se mantiene aproximadamente en  $50\Omega$  y el VSWR mejoró siendo este un valor de 1.12 que significa que la línea de transmisión está bien acoplada, por ende las pérdidas y la energía reflejada será menor, las Figuras 3.30 y 3.31 muestran lo antes dicho.

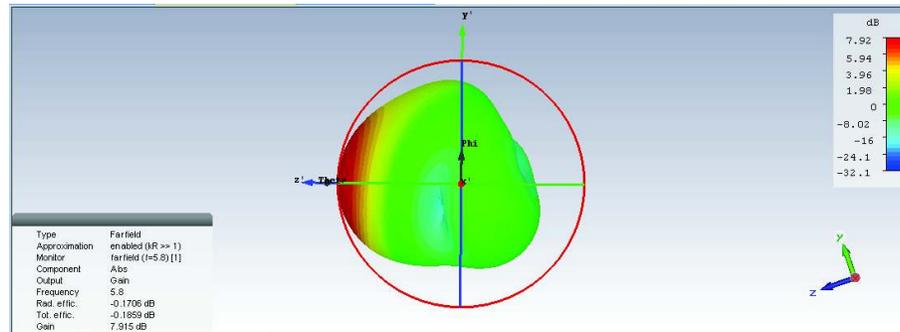


**Figura 3. 30** Impedancia característica a la frecuencia de 5.8 GHz

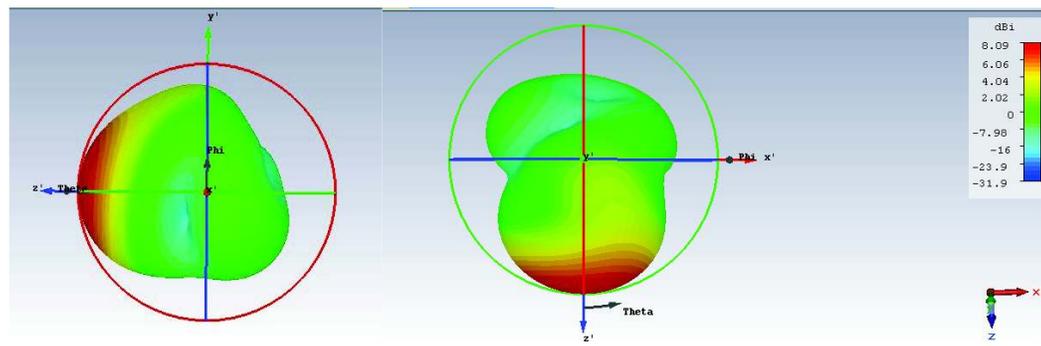


**Figura 3. 31** VSWR a la frecuencia de 5.8 GHz

Luego de aumentar un director más, la ganancia aumenta en 1.61 dB y la antena se hace más directiva, concentrando así la energía en una zona determinada como se ilustra en las Figuras 3.32 y 3.33.



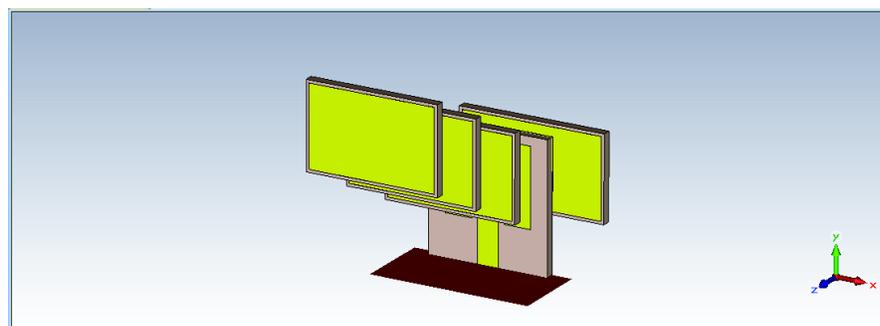
**Figura 3. 32** Ganancia de la antena con dos directores a 5.8 GHz



**Figura 3. 33** Directividad de la antena con dos directores a 5.8 GHz

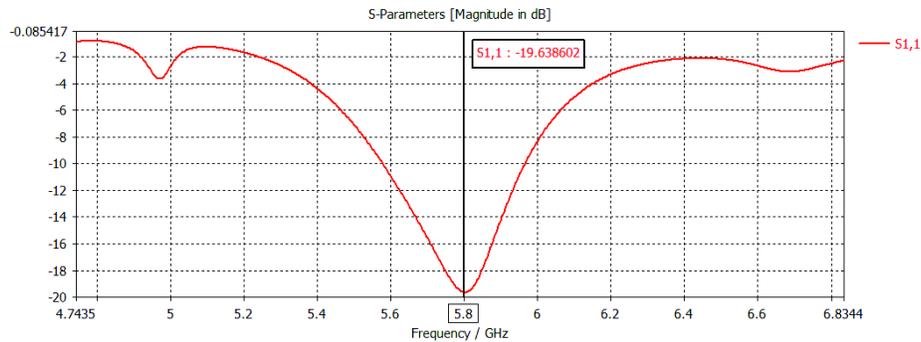
### 3.3.1.3 Tres elementos directores

Ahora se presenta un director más que nos permita mejorar aún más la ganancia y directividad de la antena, Figura 3.34.



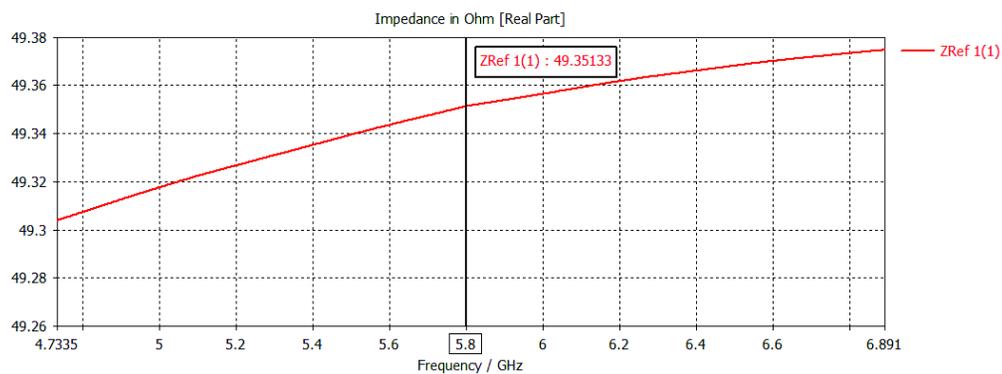
**Figura 3. 34** Antena Yagi con tres directores

La Figura 3.35 representa la resonancia de la antena a 5.8 GHz y el coeficiente de reflexión a esta frecuencia.

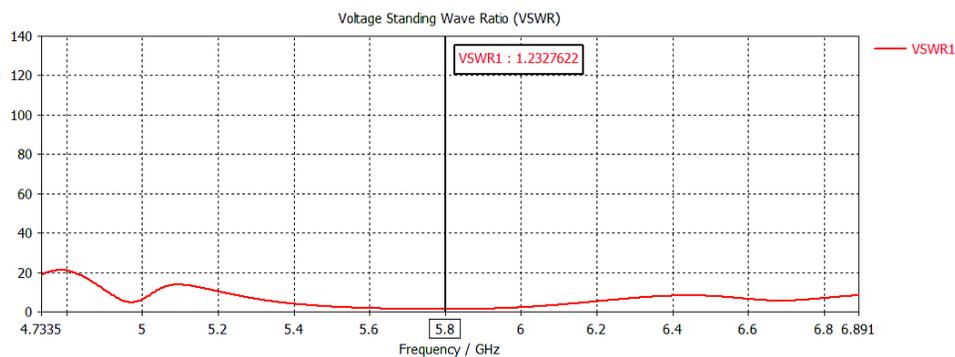


**Figura 3. 35** Parámetros S con tres elementos directores

A medida que se va aumentando el número de directores la impedancia casi no varía, el VSWR es el que va variando pero aun así se mantiene dentro de un rango aceptable que permite pérdidas menores, las Figuras 3.36 y 3.37 ilustran lo antes expuesto.

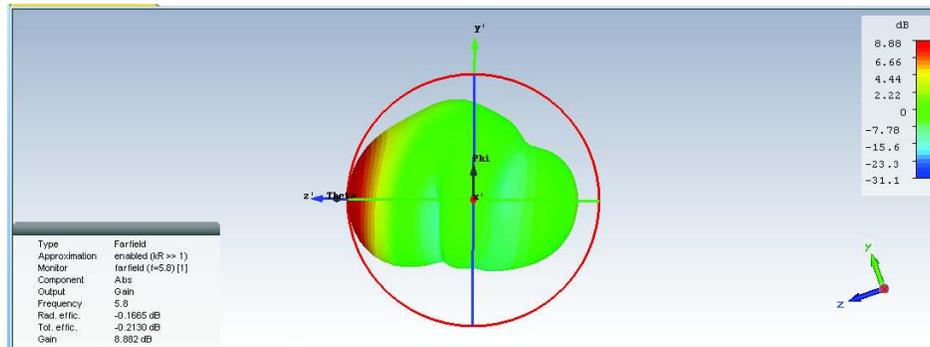


**Figura 3. 36** Impedancia característica a la frecuencia de 5.8 GHz

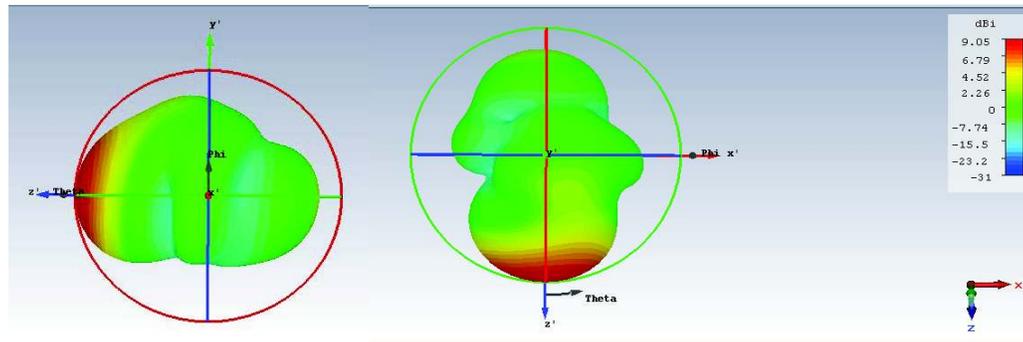


**Figura 3. 37** VSWR a la frecuencia de 5.8 GHz

Al aumentar un director más el valor de la ganancia de la antena pasó de 7.95 dB a 8.88 dB como lo muestra la Figura 3.38 y la directividad de 8.09 dBi a 9.05 dBi siendo así más directiva que la antena anterior indicada en la Figura 3.39.



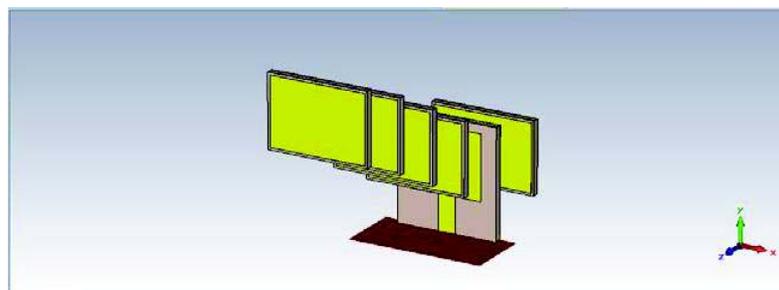
**Figura 3. 38** Ganancia de la antena con tres directores a 5.8 GHz



**Figura 3. 39** Directividad de la antena con tres directores a 5.8 GHz

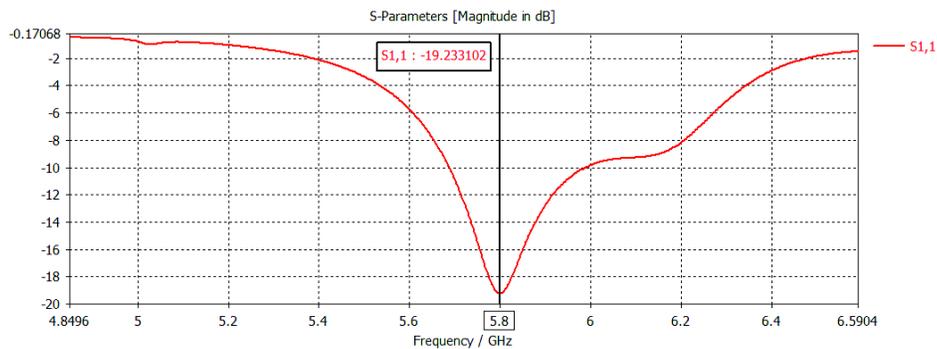
### 3.3.1.4 Cuatro elementos directores

Por último se ha dispuesto la configuración de la antena Yagi con cuatro elementos directores como se observa en la Figura 3.40, separados uno de otro la distancia de  $0.2\lambda$ , es decir 10.345 mm.



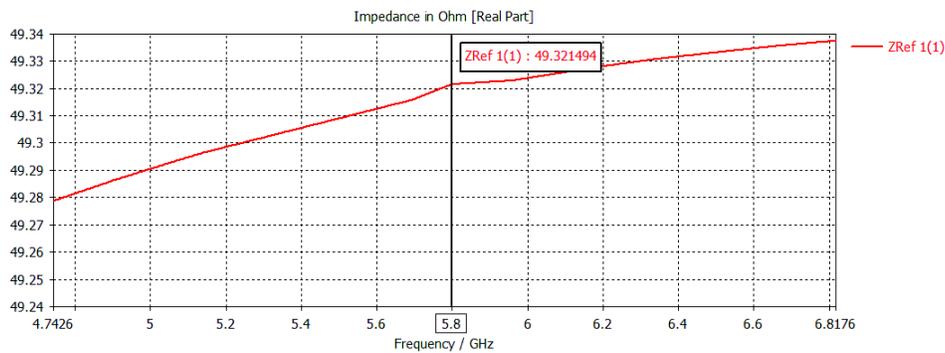
**Figura 3. 40** Antena Yagi con cuatro directores

La Figura 3.41 muestra los parámetros S en donde se muestra que la antena resuena a una frecuencia de 5.8 GHz con cuatro elementos directores, el coeficiente de reflexión es alrededor de -19 dB.

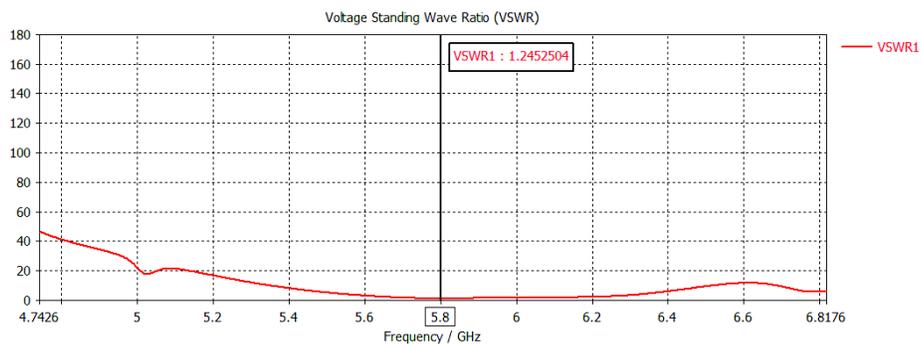


**Figura 3. 41** Parámetros S con cuatro elementos directores

La impedancia en este arreglo de elementos está cerca del valor de  $50\Omega$  a la frecuencia de resonancia, la Figura 3.42 muestra lo anteriormente mencionado, el VSWR está en un valor de 1.245 a la frecuencia de 5.8 GHz, la Figura 3.43 indica el índice de acoplamiento a la frecuencia de interés.



**Figura 3. 42** Impedancia característica a la frecuencia de 5.8 GHz



**Figura 3. 43** VSWR a la frecuencia de 5.8 GHz

La ganancia con cuatro elementos directores ha aumentado a 9.65 dB como se observa en la Figura 3.44, en la Figura 3.45 se muestra el lóbulo de radiación en coordenadas polares en función de los ángulos  $\Phi$  y  $\theta$ , la Figura 3.46 presenta el lóbulo de radiación visto en coordenadas rectangulares, en el que se divide el contorno del lóbulo y como va variando el valor de su ganancia en cada punto.

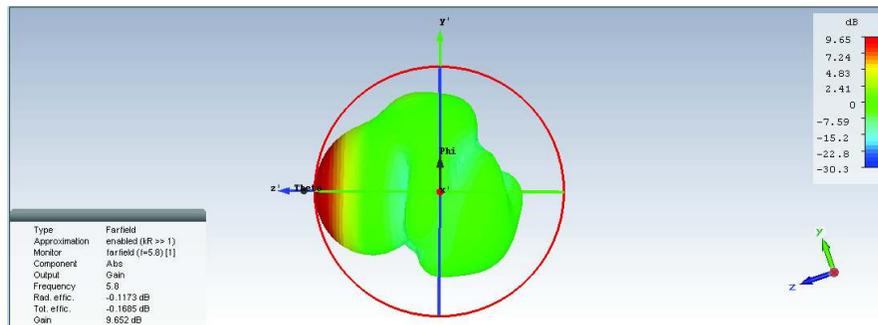


Figura 3. 44 Ganancia de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz

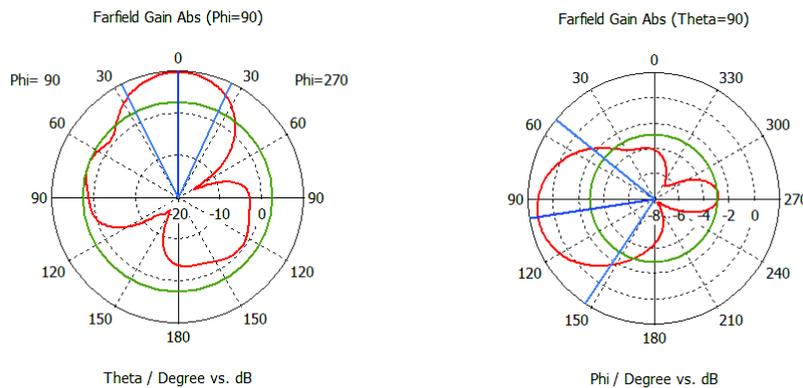


Figura 3. 45 Ganancia de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz en coordenadas polares

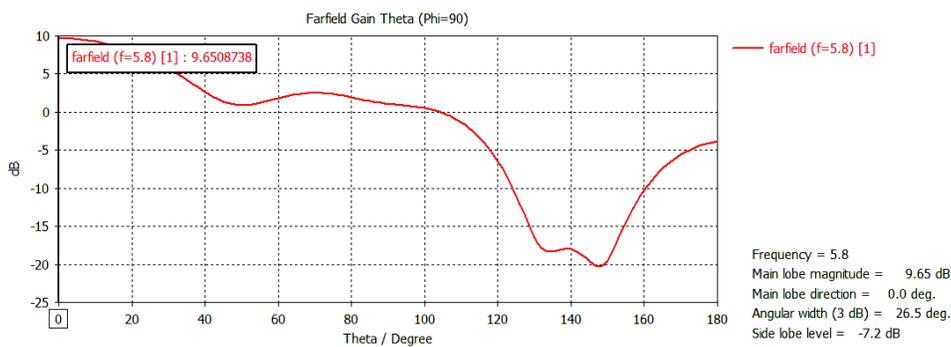
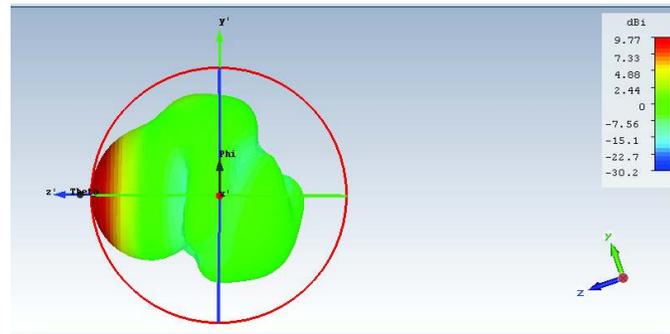
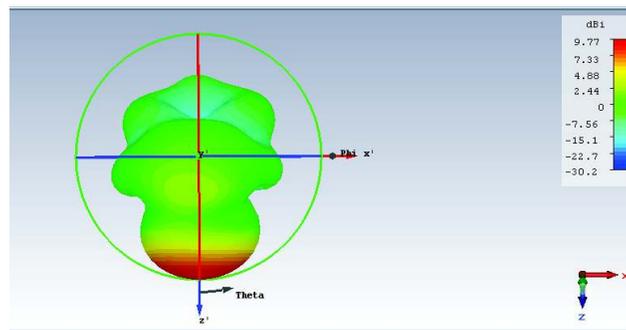


Figura 3. 46 Ganancia de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz en coordenadas cartesianas

Las Figuras 3.47 y 3.48 muestran la directividad de la antena vista desde los planos horizontal y vertical en dimensionamiento 3D, la energía de la antena tiene un haz más angosto, enfocándose a un área más pequeña.

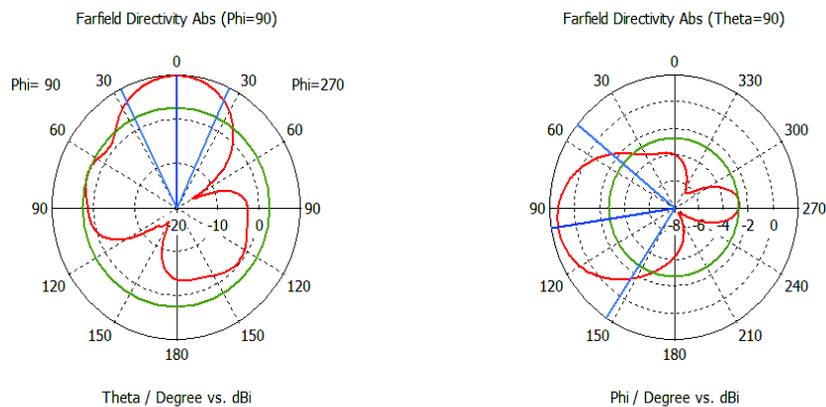


**Figura 3. 47** Directividad de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz plano horizontal



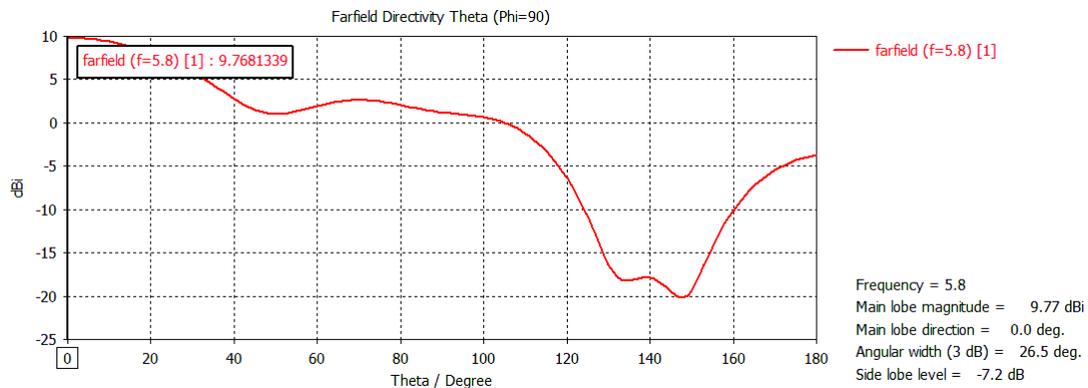
**Figura 3. 48** Directividad de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz plano vertical

El plano polar muestra el ángulo de directividad que presenta el lóbulo de radiación, y los diferentes lóbulos secundarios provocados por los elementos directores, la Figura 3.49 refleja la medida de la directividad en los ángulos  $\Phi$  y  $\theta$ .



**Figura 3. 49** Directividad de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz en coordenadas polares

En la figura 3.50 el plano de coordenadas cartesianas muestra como la directividad va aumentando siendo casi un valor de 10dB.



**Figura 3. 50** Directividad de la antenna con cuatro directores a 5.8 GHz en coordenadas cartesianas

El análisis se realizó hasta 4 elementos directores debido a que se consideró que la longitud y parámetros de la antenna alcanzados serían suficientes para emitir un buen criterio para la elección del método de diseño apropiado para construir la antenna.

Por tanto la antenna Yagi tendrá como máximo 4 directores, cabe mencionar que con estas condiciones se obtuvo una excelente ganancia y directividad.

A continuación se presenta un resumen de los parámetros de la antenna desde uno hasta finalmente llegar a cuatro elementos directores, la Tabla 3.2, presenta un cuadro comparativo de los mismos parámetros pero con un número diferente de elementos directores.

**Tabla 3. 2** Parámetros medidos al aumentar el número de directores por método de tablas

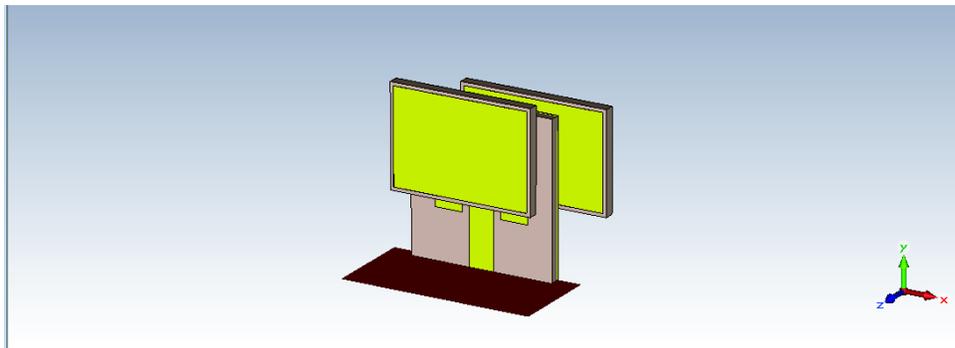
| Parámetros                | No. Directores |            |           |          |
|---------------------------|----------------|------------|-----------|----------|
|                           | 1              | 2          | 3         | 4        |
| Ganancia                  | 6.31 dB        | 7.92 dB    | 8.88 dB   | 9.65 dB  |
| Directividad              | 6.4 dBi        | 8.09 dBi   | 9.05 dBi  | 9.77 dBi |
| Coefficiente de Reflexión | -11.2 dB       | -24.903 dB | -19.72 dB | -19.2 dB |
| VSWR                      | 1.754          | 1.123      | 1.233     | 1.245    |

### 3.3.2 MÉTODO POR CALCULADORA

#### 3.3.2.1 Un elemento director

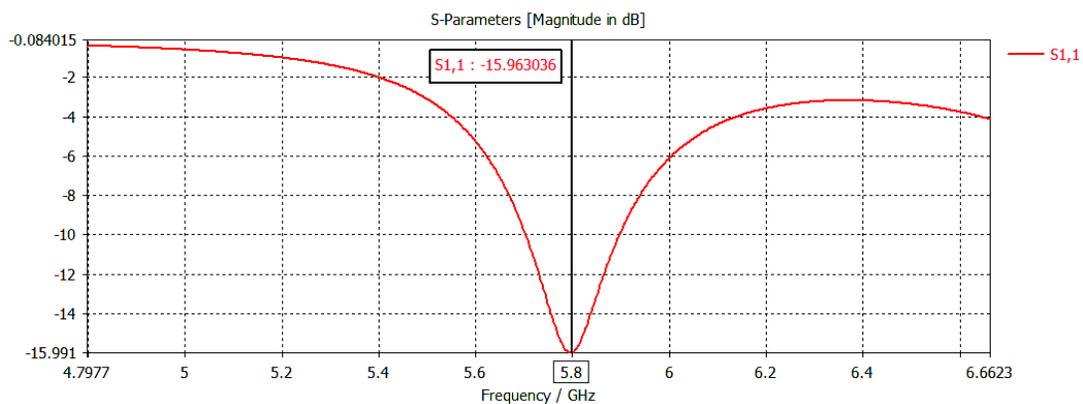
A diferencia del método de diseño por tablas, la separación entre elementos es diferente, sin embargo, la longitud de los elementos parásitos varían en unidades milimétricas entre cada método.

Inicialmente se parte de un director y un reflector separados del elemento radiante 4mm y 12 mm respectivamente, como se muestra en la Figura 3.51.



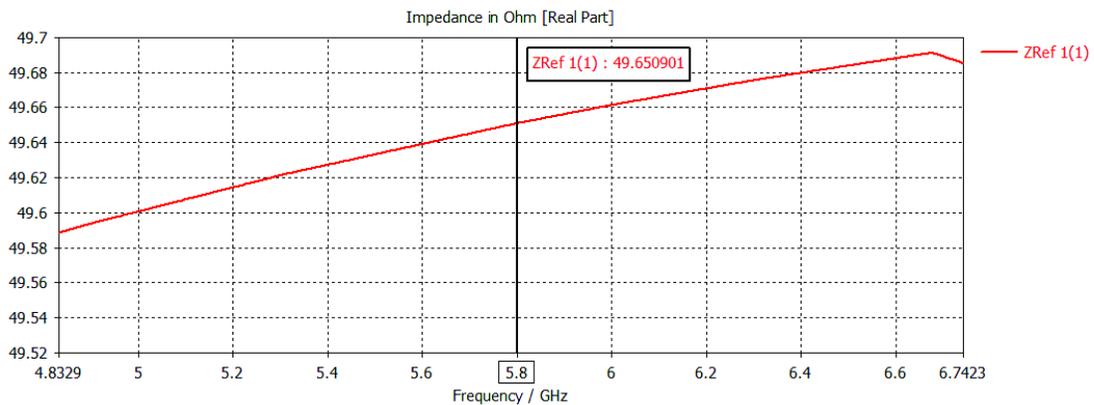
**Figura 3. 51** Antena Yagi con un director

La siguiente Figura 3.52 muestra como mediante parámetros S se puede saber a qué frecuencia resuena la antena, en este caso la antena resuena a una frecuencia de 5.8 GHz con coeficiente de reflexión de -16 dB.

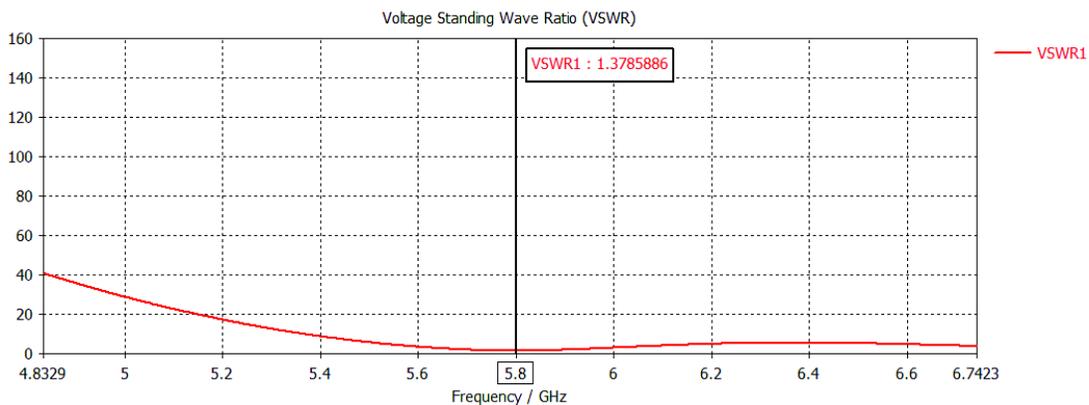


**Figura 3. 52** Parámetros S con un elemento director

La impedancia que se desea obtener es de  $50\Omega$  y el valor que se obtiene es un valor aproximado que se muestra en la Figura 3.53 a la frecuencia de resonancia deseada, además la relación de VSWR es un valor apropiado siendo este de 1.379, por lo que se dice que hay un adecuado acoplamiento entre la línea de transmisión y el elemento radiante, la Figura 3.54 indica la relación antes mencionada.

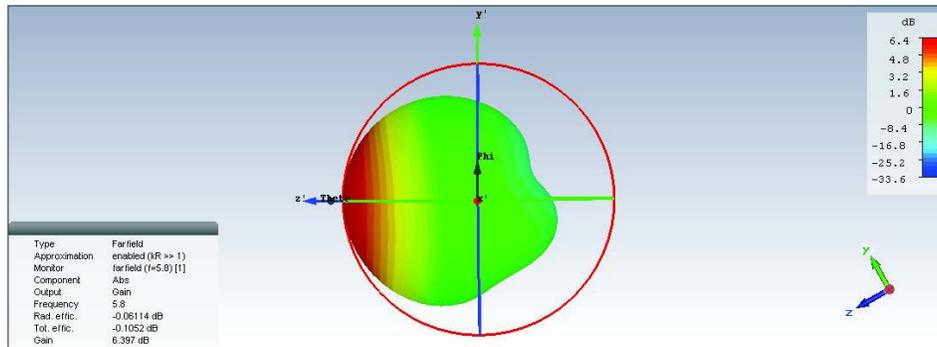


**Figura 3. 53** Impedancia característica a la frecuencia de 5.8 GHz

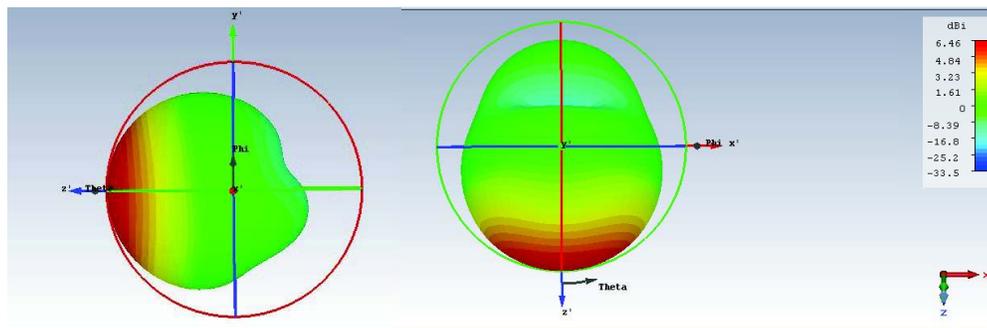


**Figura 3. 54** VSWR a la frecuencia de 5.8 GHz

Las Figuras 3.55 y 3.56 representan la ganancia y directividad de la antena con un elemento director respectivamente, en la primera figura se observa como la ganancia aumentó de 5.33 dB a 6.4 dB y en la segunda como la directividad pasó de 5.67 dBi a 6.46 dBi.



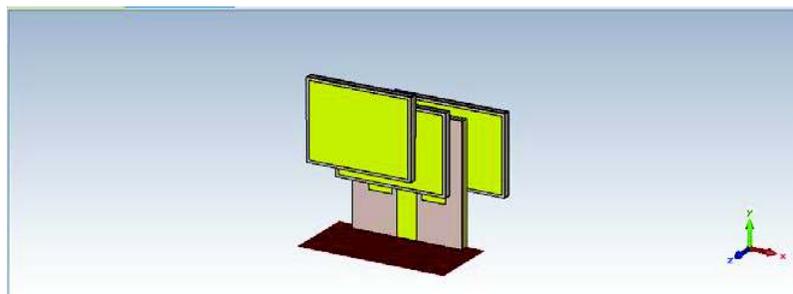
**Figura 3. 55** Ganancia de la antena con un director a 5.8 GHz



**Figura 3. 56** Directividad de la antena con un director a 5.8 GHz

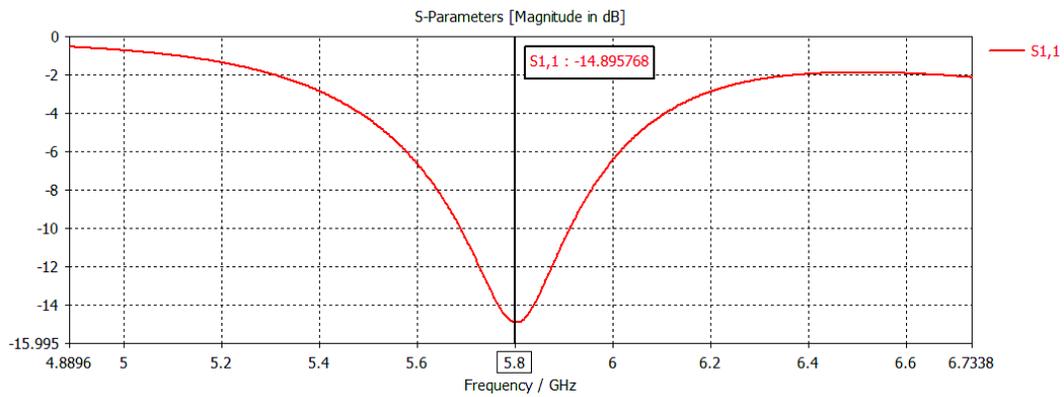
### 3.3.2.2 Dos elementos directores

Después de observar el comportamiento de la antena se coloca un segundo elemento director a una distancia de 9 mm como se muestra en la Figura 3.57 con respecto al primer director.



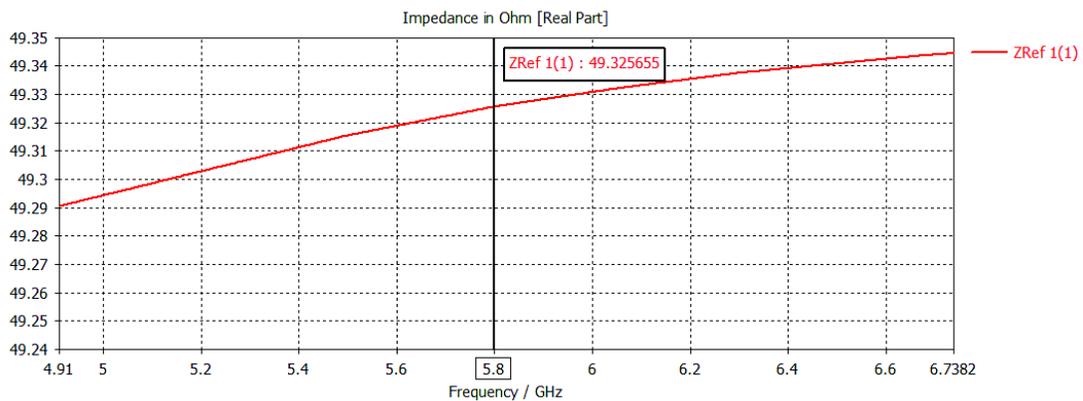
**Figura 3. 57** Antena Yagi con dos directores

El coeficiente de reflexión a la frecuencia de resonancia se aproximan a -15 dB, representadas en la Figura 3.58, teniendo mayores pérdidas en comparación a los resultados obtenidos en la simulación de la antena con dos elementos directores por el método de tablas.

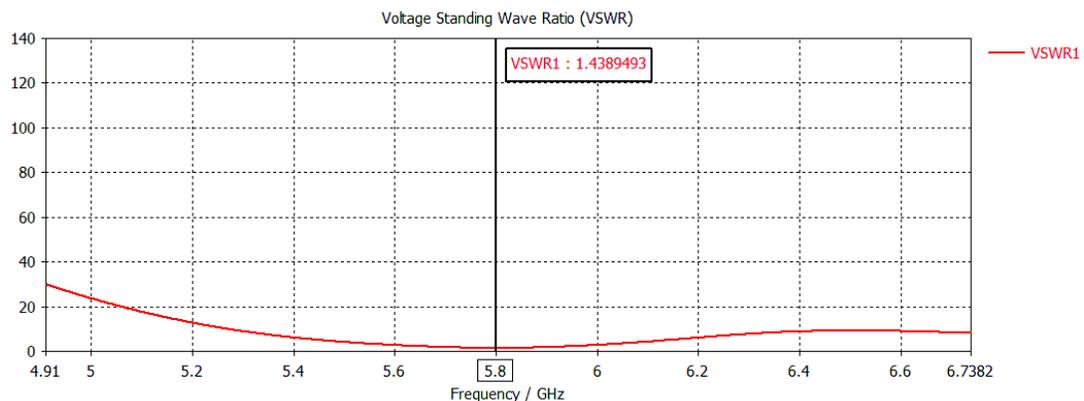


**Figura 3. 58** Parámetros S con dos elementos directores

La impedancia de la antena se mantiene en un valor cercano a  $50 \Omega$  en la frecuencia de 5.8 GHz y un VSWR de 1.439, las Figuras 3.59 y 3.60 respectivamente son representaciones de los valores antes expuestos.

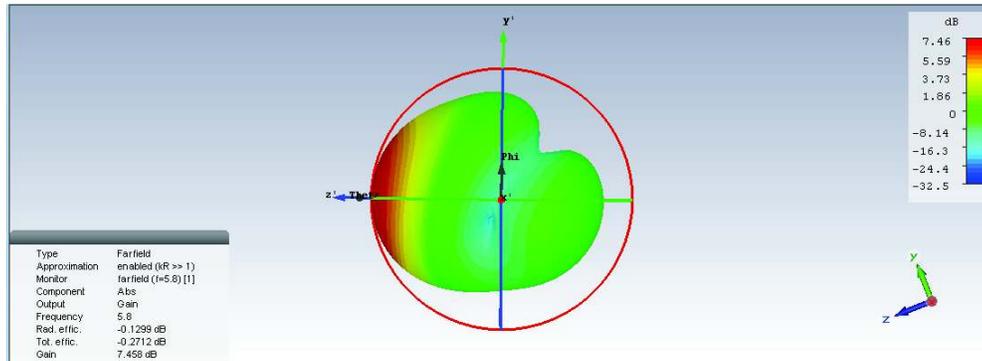


**Figura 3. 59** Impedancia característica a la frecuencia de 5.8 GHz

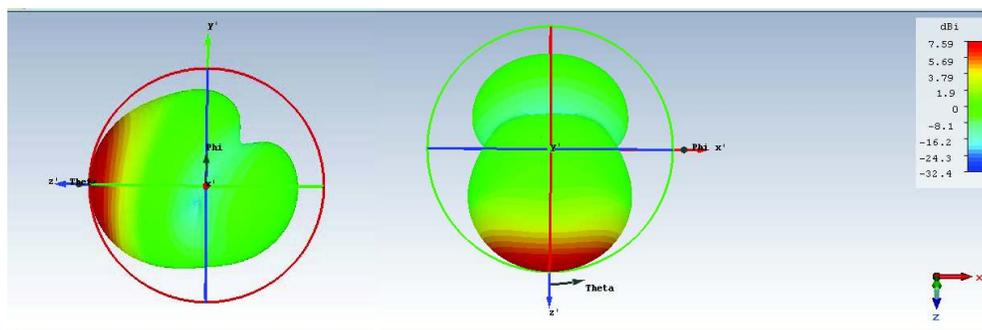


**Figura 3. 60** VSWR a la frecuencia de 5.8 GHz

A medida que se antepone un elemento director, la ganancia y directividad continúan aumentando ahora de 7.46 dB y 7.59 dBi respectivamente y representados en las Figuras 3.61 y 3.62.



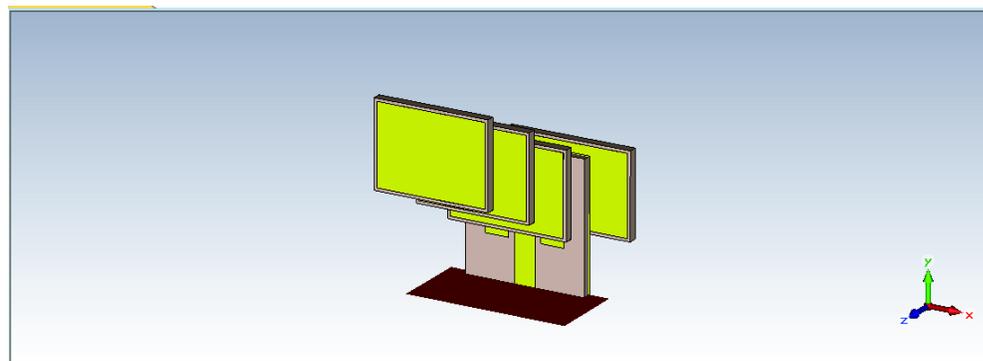
**Figura 3. 61** Ganancia de la antena con dos directores a 5.8 GHz



**Figura 3. 62** Directividad de la antena con dos directores a 5.8 GHz

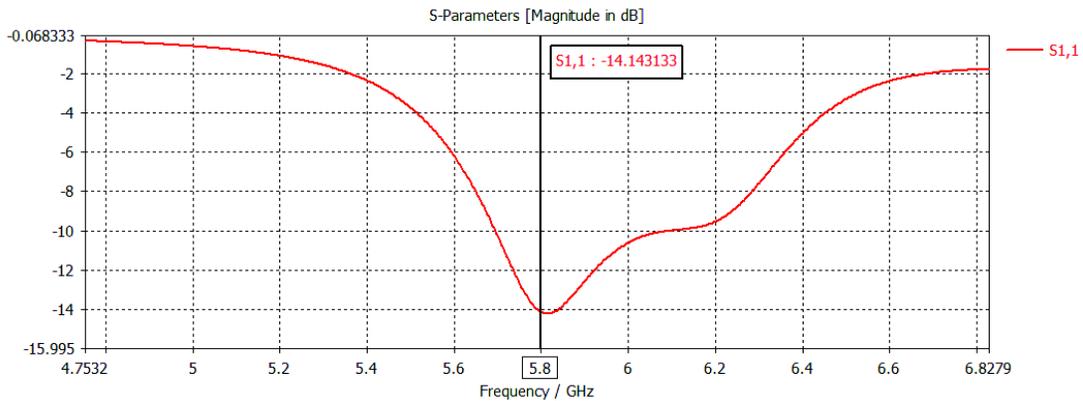
### 3.3.2.3 Tres elementos directores

La Figura 3.63 muestra como se ha aumentado un director más a una distancia de 11 mm respecto al segundo elemento director.



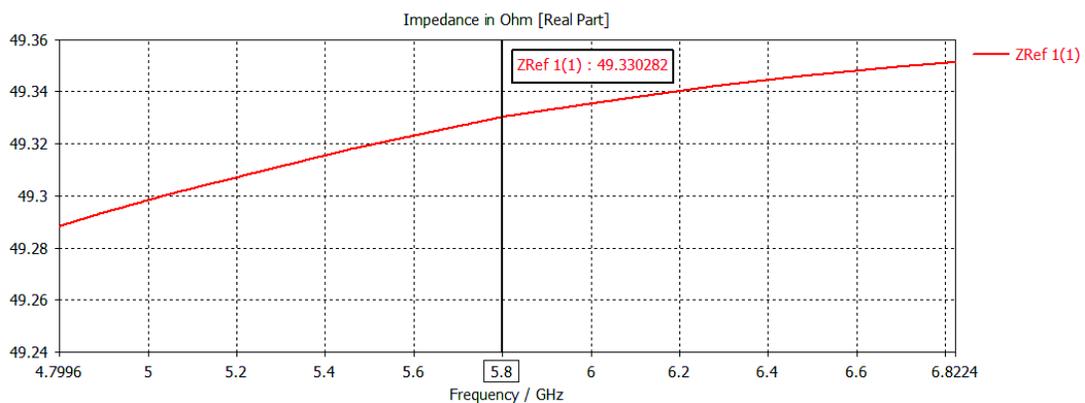
**Figura 3. 63** Antena Yagi con tres directores

La Figura 3.64 presenta la resonancia de la antena en la frecuencia deseada pero se observa que a la frecuencia de 6.2 GHz hay una pequeña fluctuación, puede deberse a la presencia de los elementos directores que pueden perturbar el comportamiento de la antena.

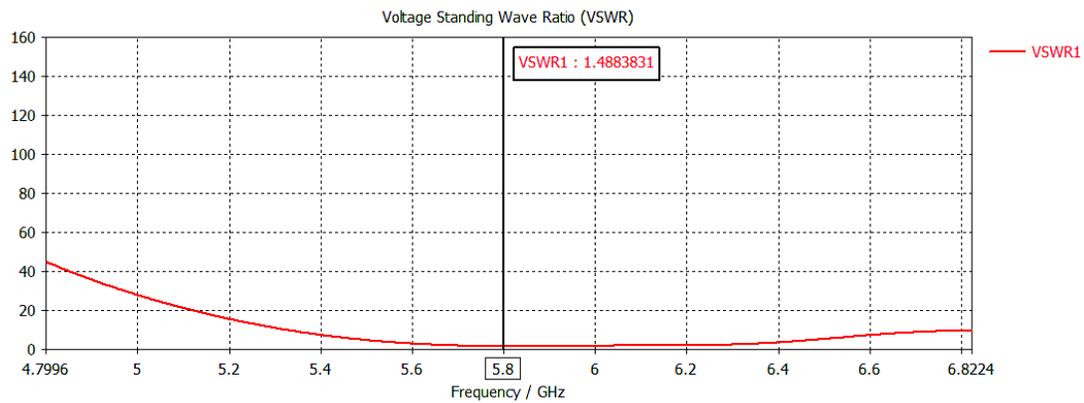


**Figura 3. 64** Parámetros S con tres elementos directores

La impedancia de la antena reflejada en la Figura 3.65 permanece en un valor cercano a la impedancia que se busca a la frecuencia de resonancia, la relación de acoplamiento indicado en la Figura 3.66 es de 1.488 siendo un valor acorde para un buen acoplamiento.

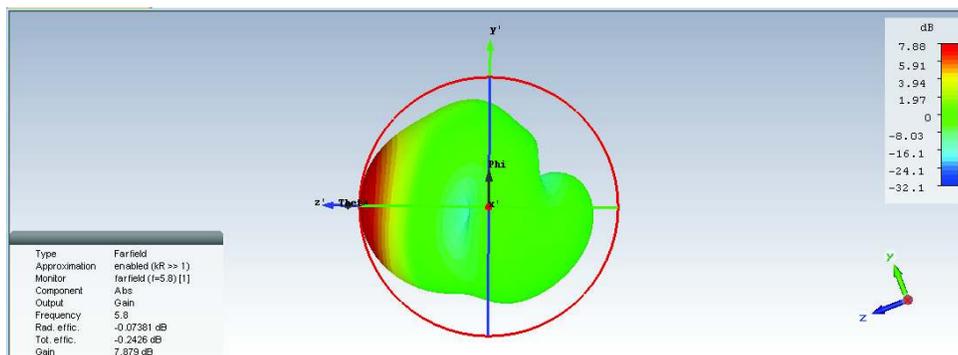


**Figura 3. 65** Impedancia característica a la frecuencia de 5.8 GHz

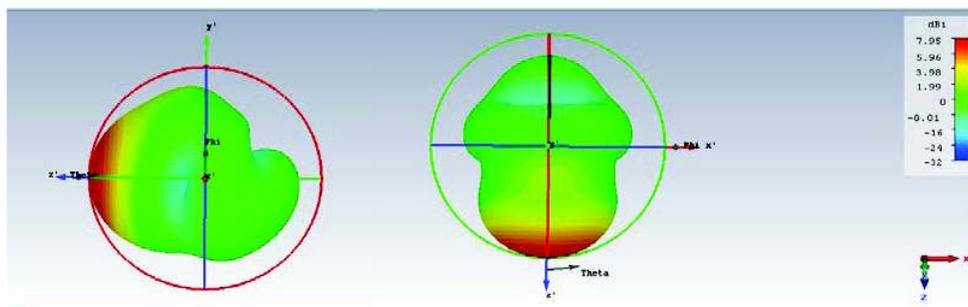


**Figura 3. 66** VSWR a la frecuencia de 5.8 GHz

La ganancia y directividad no aumentaron en valor de unidades en comparación con la antena de dos directores, su energía se concentra en un área más pequeña que es lo esperado, la concentración de energía se puede observar tanto en las gráficas de la ganancia como de la directividad en las Figuras 3.67 y 3.68 respectivamente.



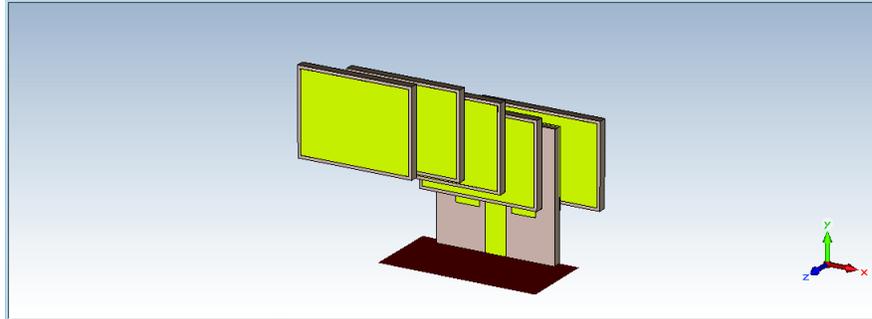
**Figura 3. 67** Ganancia de la antena con tres directores a 5.8 GHz



**Figura 3. 68** Directividad de la antena con tres directores a 5.8 GHz

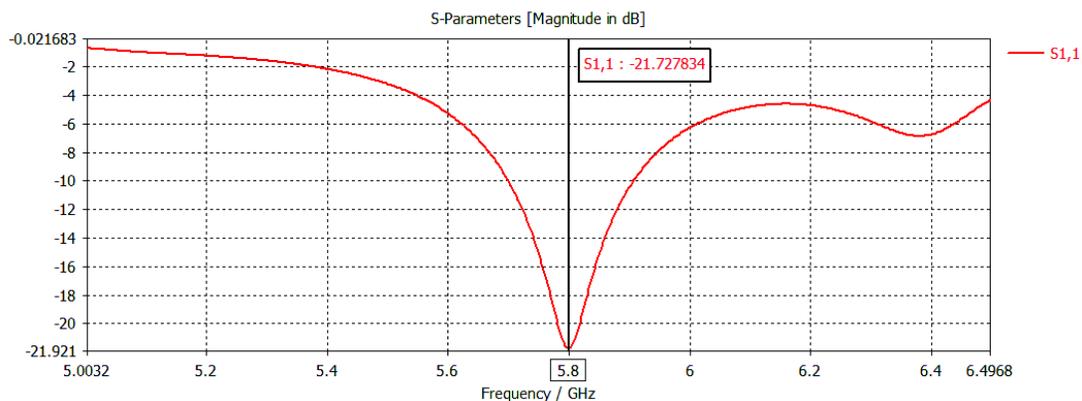
### 3.3.2.4 Cuatro elementos directores

Al igual que en el método anterior, la antena se diseñará hasta cuatro elementos directores, este último director está separado una distancia de 13 mm con respecto al tercer director, la antena con cuatro directores y un reflector se muestra en la Figura 3.69.



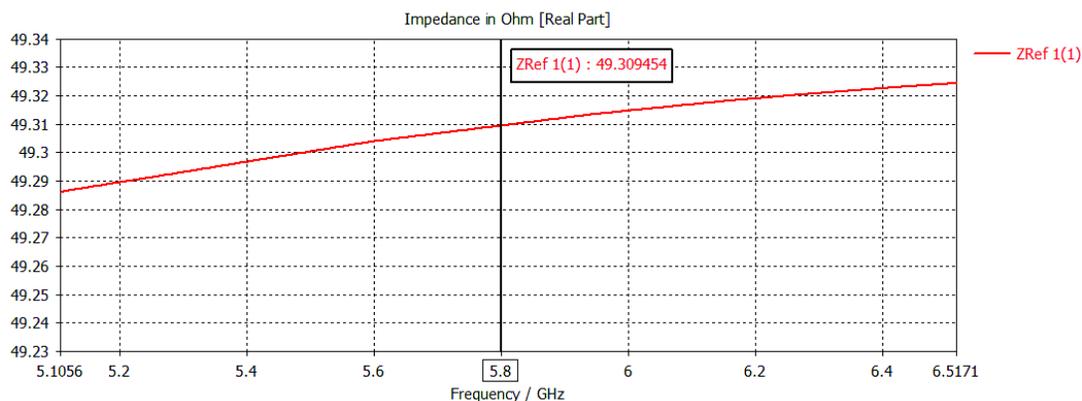
**Figura 3. 69** Antena Yagi con cuatro directores

Los parámetros S mostrados en la Figura 3.70 representan la frecuencia a la cual la antena con cuatro elementos directores resuena, en este caso 5.8 GHz, que es lo que se esperaba, a esta frecuencia el coeficiente de reflexión es de aproximadamente -22 dB.



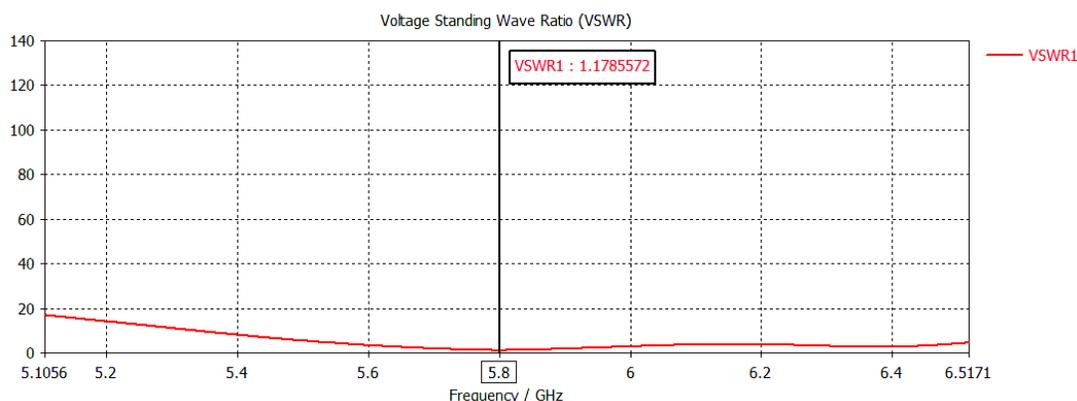
**Figura 3. 70** Parámetros S con cuatro elementos directores

La impedancia obtenida tras el aumento de los directores sigue en valores parecidos a las antenas anteriores, es decir con un número menor de directores, este valor es de aproximadamente  $50\Omega$ , que es la impedancia característica de la línea de transmisión, la Figura 3.71 muestra el valor de la impedancia de la antena.



**Figura 3. 71** Impedancia característica a la frecuencia de 5.8 GHz

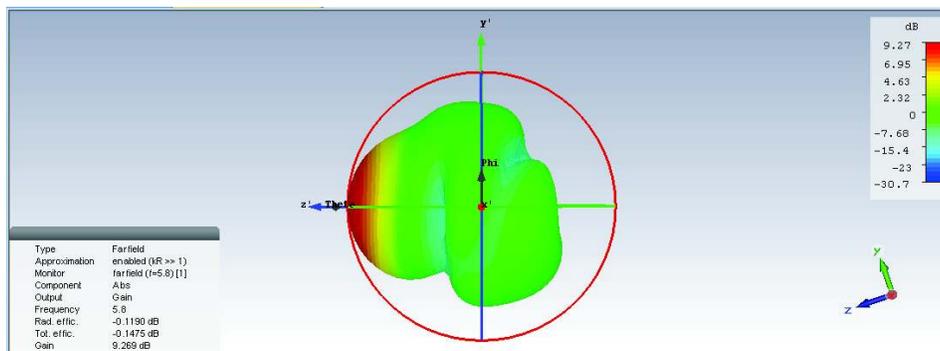
La relación de acoplamiento entre la línea de transmisión y el conductor es casi perfecta con un valor aproximado a la unidad de 1.179 considerándose un excelente acoplamiento, este valor medido durante la simulación se puede observar en la Figura 3.72.



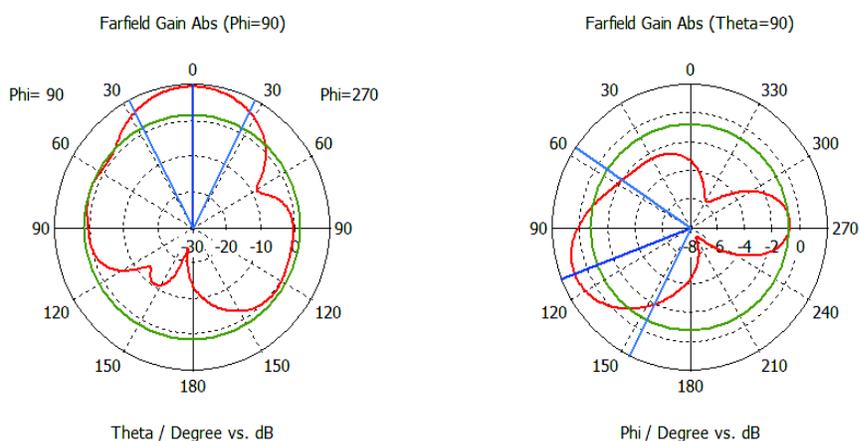
**Figura 3. 72** VSWR a la frecuencia de 5.8 GHz

La ganancia finalmente pasó de 5.33 dB sin elementos directores a 9.27dB con un aumento de 3.94dB, las Figuras 3.73 y 3.74 muestran el lóbulo de radiación en tres dimensiones y en coordenadas polares en función de los ángulos  $\Phi$  y  $\theta$  respectivamente.

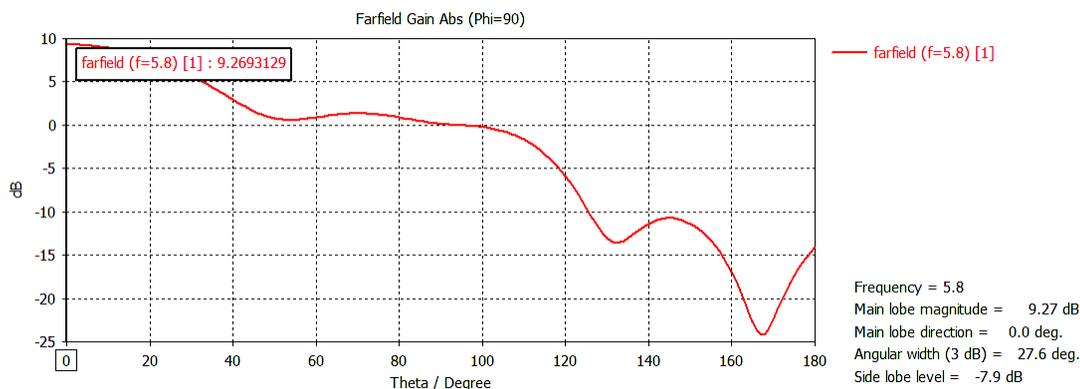
La Figura 3.75 presenta el lóbulo de radiación visto en coordenadas rectangulares, en el que se divide como va variando el valor de su ganancia en cada dirección.



**Figura 3. 73** Ganancia de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz

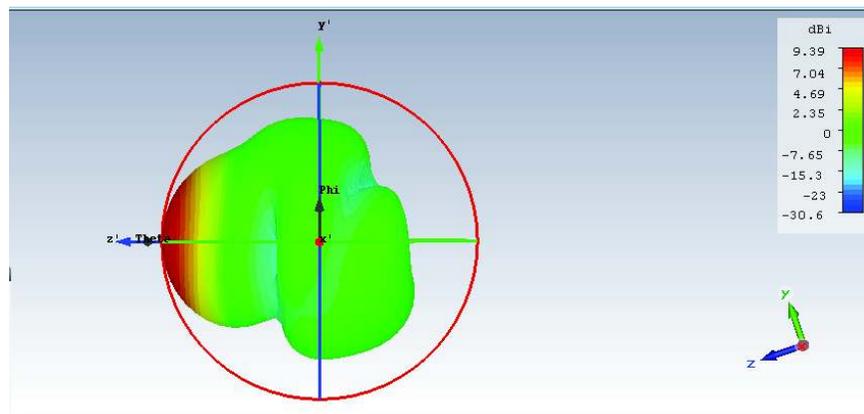


**Figura 3. 74** Ganancia de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz en coordenadas polares

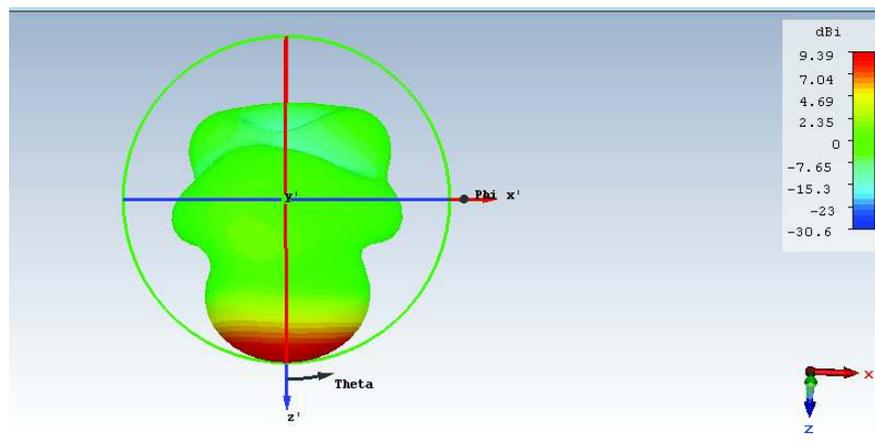


**Figura 3. 75** Ganancia de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz en coordenadas cartesianas

La directividad de la antena pasó de un valor inicial de 5.67dBi a 9.39dBi, las Figuras 3.76 y 3.77 muestran la directividad de la antena vista desde los planos horizontal y vertical en dimensionamiento 3D, en la que se evidencia como la energía se concentra en una zona más pequeña, haciéndose cada vez más directiva.

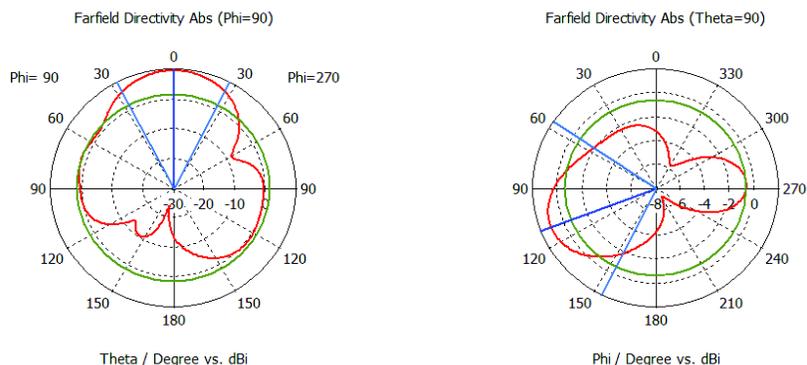


**Figura 3. 76** Directividad de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz plano horizontal



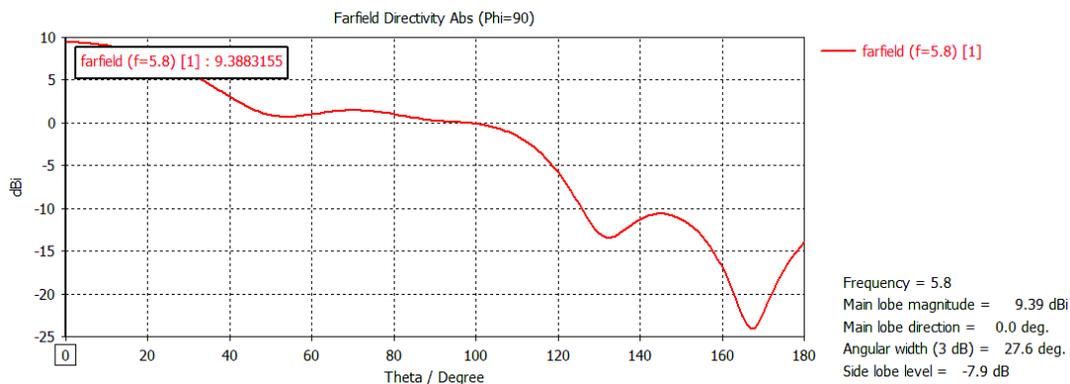
**Figura 3. 77** Directividad de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz plano vertical

En la Figura 3.78 se muestra el lóbulo de radiación en coordenadas polares, la directividad de la antena medida en grados, desde los ángulos  $\Phi$  y  $\theta$ .



**Figura 3. 78** Directividad de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz en coordenadas polares

La directividad ilustrada desde el plano de coordenadas cartesianas mostrado en la figura 3.79 indica la directividad máxima alcanzada por la antena en este caso un valor aproximado de 10dB.



**Figura 3. 79** Directividad de la antena con cuatro directores a 5.8 GHz en coordenadas cartesianas

En la tabla 3.3 se presenta un resumen de los resultados de parámetros medidos en las simulaciones anteriormente presentadas.

**Tabla 3. 3** Parámetros medidos al aumentar el número de directores por método de calculadora

| Parámetros                | No. Directores |          |          |            |
|---------------------------|----------------|----------|----------|------------|
|                           | 1              | 2        | 3        | 4          |
| Ganancia                  | 5.1 dB         | 7.44 dB  | 7.88 dB  | 9.27 dB    |
| Directividad              | 5.18 dBi       | 7.59 dBi | 7.95 dBi | 9.39 dBi   |
| Coefficiente de reflexión | -16 dB         | -14.8 dB | -14.1 dB | -21.929 dB |
| VSWR                      | 1.379          | 1.439    | 1.488    | 1.179      |

Al comparar las tablas de resultados de los dos métodos de diseño, los datos obtenidos son casi similares tanto la ganancia como la directividad con 4 elementos, cada método supera los 9 dB, en lo que difieren es en el coeficiente de reflexión y en la relación de acoplamiento (VSWR).

Cada vez que se aumenta un director la frecuencia de resonancia cambia debido a que se aumenta un elemento parásito por lo que se debe ajustar las medidas del elemento conductor para que vuelva a resonar en la frecuencia deseada, 5.8 GHz.

Para fabricar la antena se eligió el método en base a los resultados de las Tablas 3.2 y 3.3, como ambos presentan valores de ganancia y directividad similares, se basó en el valor de coeficiente de reflexión en la antena con cuatro elementos directores, seleccionando así el método por calculadora ya que a la vez este se acerca más a un diseño real de una antena microstrip, debido a que permite ingresar valores como del grosor del sustrato en lugar del diámetro del director.

Se realizaron varios ajustes en las mediciones del diseño del elemento radiante, en la Tabla 3.4 se muestra un cuadro comparativo de los valores diseñados en el Capítulo 2 y los ajustes realizados en base a los resultados obtenidos en el software de simulación utilizado en este Capítulo.

**Tabla 3. 4** Reajuste de valores de diseño del elemento conductor en base al diseño teórico y pruebas en el software de simulación

| VARIABLES  | DISEÑO [mm] | AJUSTE EN LA SIMULACIÓN [mm] |
|------------|-------------|------------------------------|
| $W_o$      | 3.25        | 3.7                          |
| $L_{Ta}$   | 7.45        | 7.45                         |
| $\gamma_o$ | 4.888       | 4.14                         |
| W          | 17.476      | 14.2                         |
| L          | 13.433      | 13.275                       |

## CAPÍTULO IV

### PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se seleccionarán los materiales adecuados para la construcción de la antena y los equipos necesarios que se van a utilizar para realizar pruebas que permitan determinar los parámetros de la antena como por ejemplo: VSWR, pérdidas por retorno, impedancia, directividad y ganancia.

Para la elaboración de la antena se elegirán materiales que brinden un funcionamiento óptimo, de manera que las pérdidas sean menores y las ganancias máximas.

#### 4.1 MATERIALES:

##### 4.1.1 RO4003C

Se seleccionó como material para la fabricación de la antena el sustrato RO4003c debido a sus características y las ganancias que proporcionó en la simulación expuesta en el capítulo anterior. Al ser una placa de uso para altas frecuencias se toma las debidas precauciones para el envío de la placa por parte de los fabricantes como se muestra en la Figura 4.1.

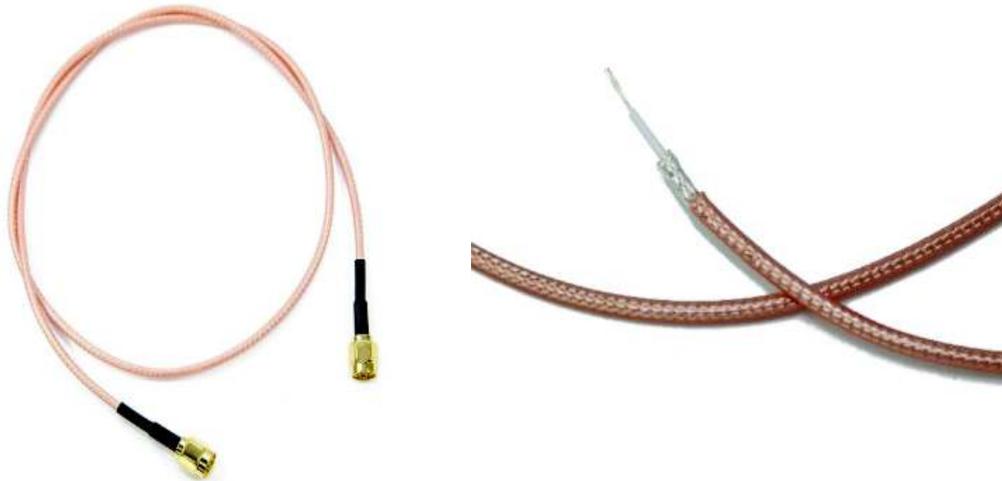


**Figura 4. 1** Desempaquetado de la Placa RO4003c

#### 4.1.2 RG316

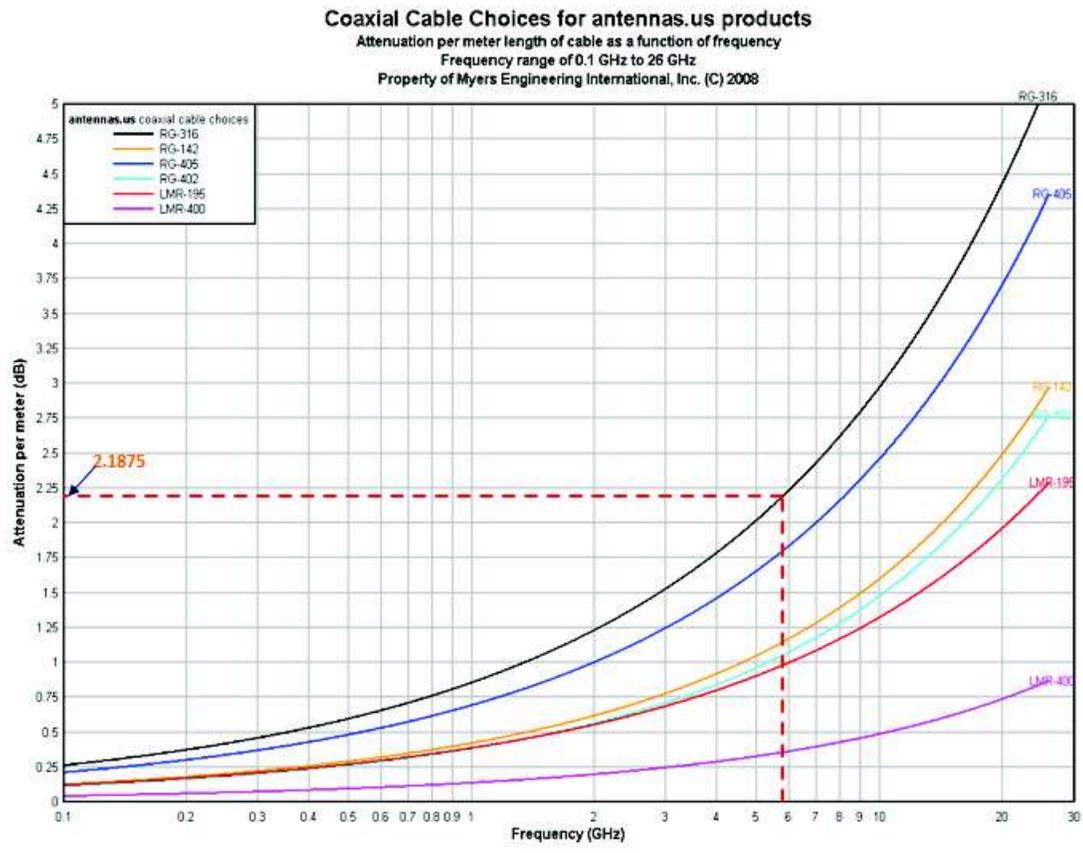
Para alimentar la antena se usó el cable RG316, debido principalmente a su flexibilidad y propiedades mecánicas como se observa en la Figura 4.2. Este tipo de cable proporciona un dieléctrico sólido que permite alta conductividad térmica y una excelente capacidad de manejo de potencia, adicionalmente se puede mencionar que opera en un amplio rango de temperaturas.

Tiene una impedancia de  $50\Omega$ , y opera en un rango de temperatura de  $-65^{\circ}\text{C}$  a  $165^{\circ}\text{C}$ , trabaja a altas frecuencias y es usado en aplicaciones como antenas, radio comunicaciones de banda ancha entre otras [49].



**Figura 4. 2** Cable coaxial RG316

En la Figura 4.3 se observa la gráfica Atenuación vs Frecuencia, en donde se aprecia que el cable RG316 trabajando a una frecuencia de 5.8GHz tiene una atenuación de casi 2 dB por metro. El cable más acorde para la frecuencia a operar es el cable LMR400 pero por factores de adquisición como costo y procedencia, no se optó por la obtención del mismo.



**Figura 4. 3** Atenuación de tipos de cable Coaxial en función a la frecuencia [50]

#### 4.1.3 CONECTOR SMA

Este tipo de conectores son diseñados para operar a una impedancia de  $50 \Omega$  hasta frecuencias de 18 GHz, con el fin de cubrir la demanda en comunicaciones inalámbricas.

El material de los conectores SMA es acero inoxidable con acoplamiento de rosca que permite un alto rendimiento, la Figura 4.4 muestra los tipos de conectores SMA hembra y macho respectivamente.



**Figura 4. 4** Conector SMA hembra y macho

#### 4.1.4 SEPARADORES DE PLACA

Los separadores de placa, o también conocidos como postes, permiten fijar una distancia entre placas, o placa y superficie a fin de evitar cualquier tipo de contacto no deseado, existen separadores metálicos y plásticos, pero debido a que el metal es un elemento conductor y eso causaría interferencia durante las mediciones se decidió usar separadores plásticos, al ser un material aislante no conduce electricidad, en la Figura 4.5 se puede observar los separadores plásticos que se encuentran en el mercado.

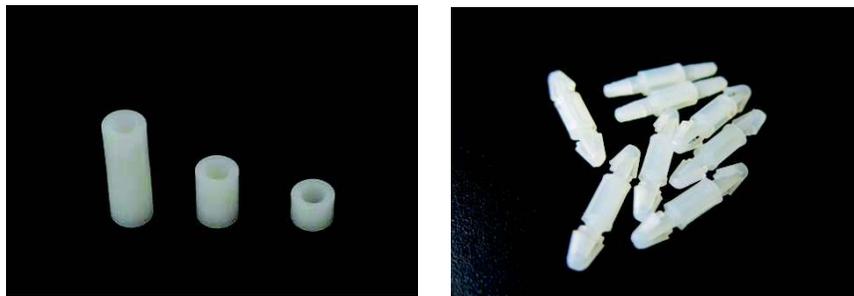


Figura 4. 5 Separadores Plásticos

#### 4.2 CONSTRUCCIÓN DE LA ANTENA

Una vez seleccionados los elementos a utilizar se prosigue con la construcción de la placa, se realiza el diseño en el programa Ares de Proteus o en Autocad para luego proceder a imprimir en la placa, como se muestra en la Figura 4.6.

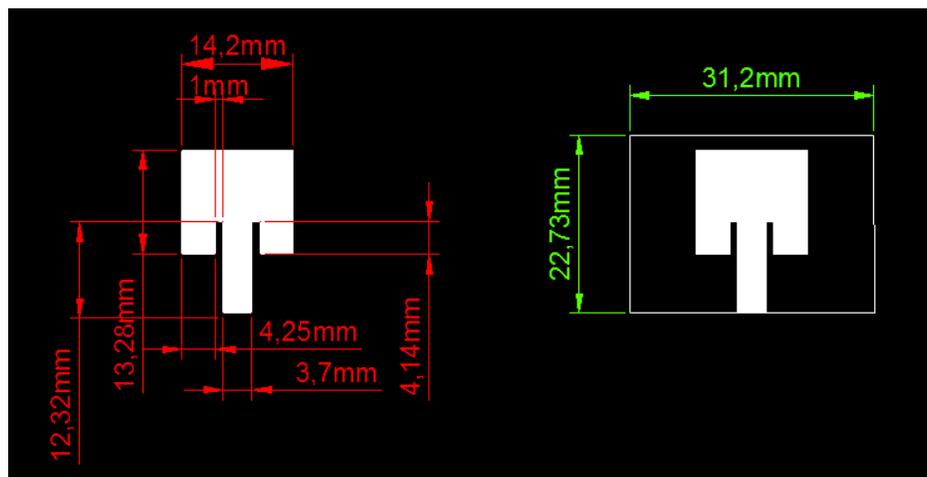
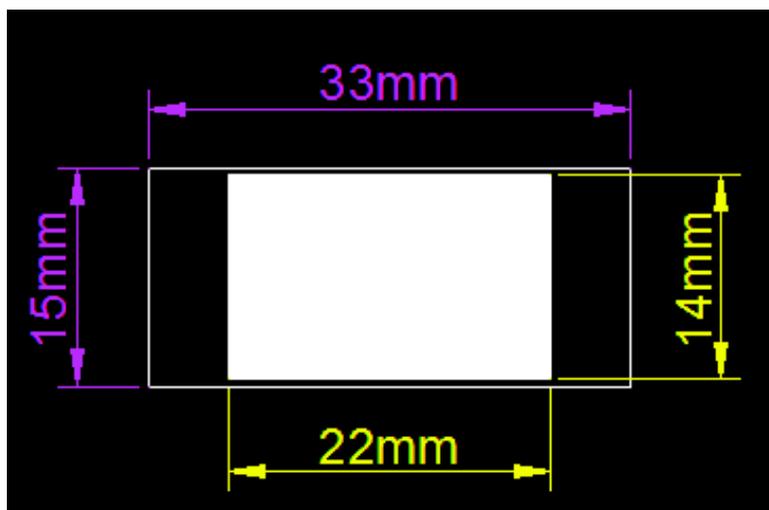
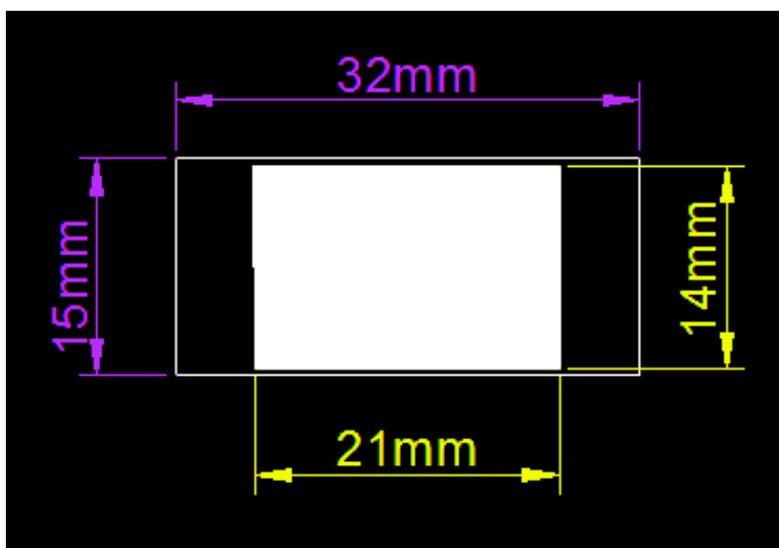


Figura 4. 6 Diseño de la Antena en Autocad

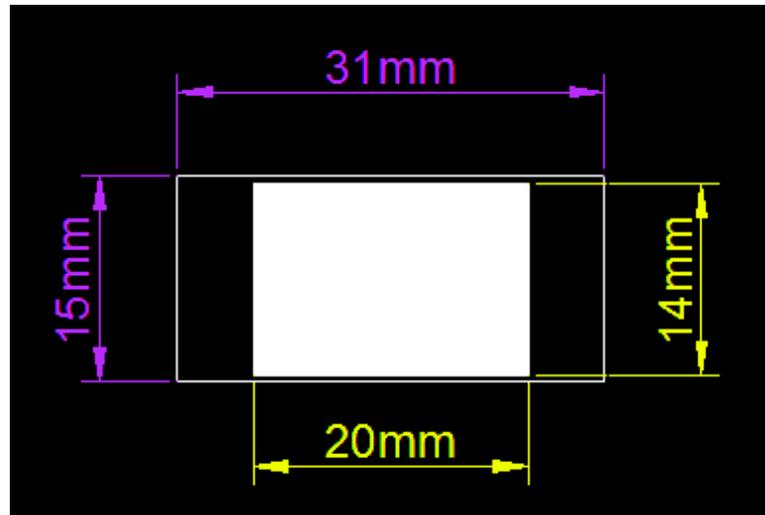
El diseño de las placas de los elementos directores es más sencillo ya que no requieren medidas tan pequeñas en comparación con el elemento radiante. En la Figura 4.7, se presenta el diseño del elemento reflector y en las Figuras 4.8 y 4.9 los diseños de los elementos directores en base a las medidas obtenidas en el capítulo 2, en la Figura 4.8 se observa el diseño del primer director, los elementos directores segundo, tercero y cuarto al ser del mismo tamaño se presenta un solo diseño expuesto en la Figura 4.9.



**Figura 4. 7** Diseño del Reflector

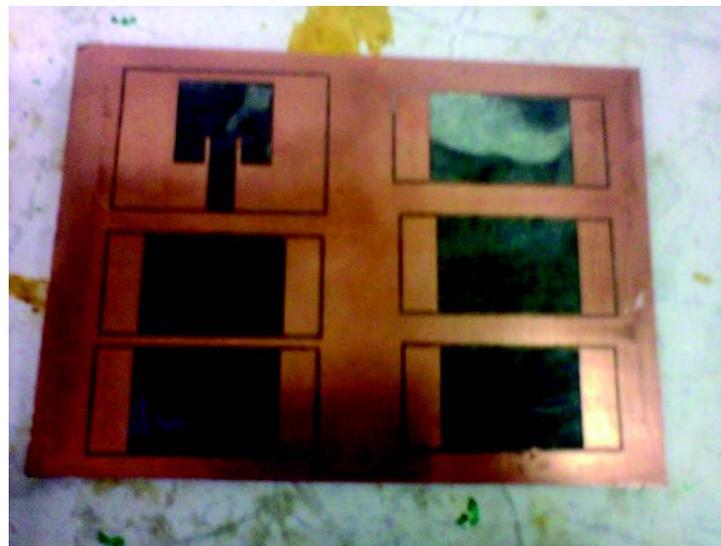


**Figura 4. 8** Diseño del primer director



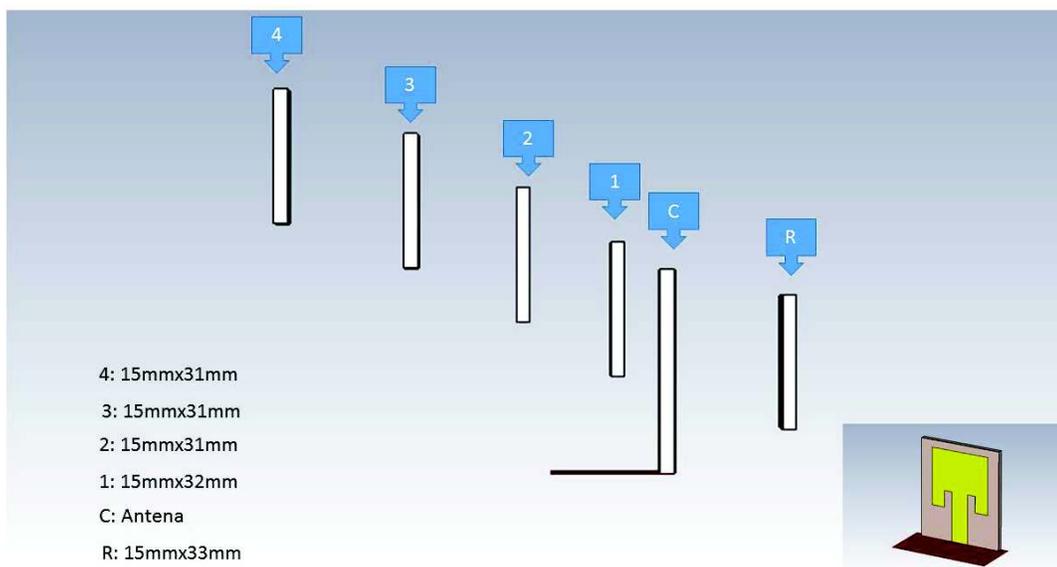
**Figura 4. 9** Diseño del segundo, tercer y cuarto director

Con el diseño final en Autocad se procede a imprimir en la baquelita RO4003c, en la Figura 4.10 se puede observar los diseños tanto del elemento conductor como de los elementos parásitos sobre la placa.



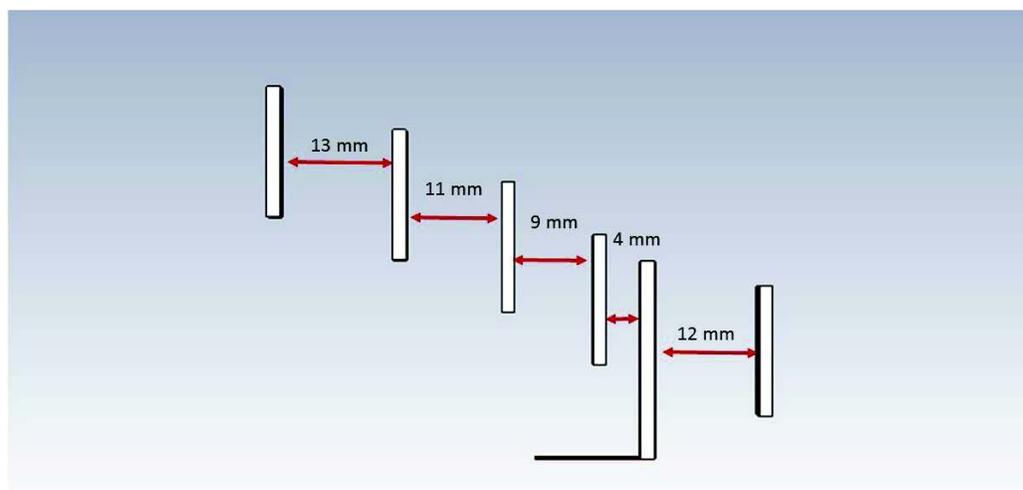
**Figura 4. 10** Baquelita con los elementos diseñados

La distribución de las placas se basa en el esquema mostrado en la Figura 4.11, en el que se indica claramente la dimensión de las placas y su orden respecto al elemento conductor.



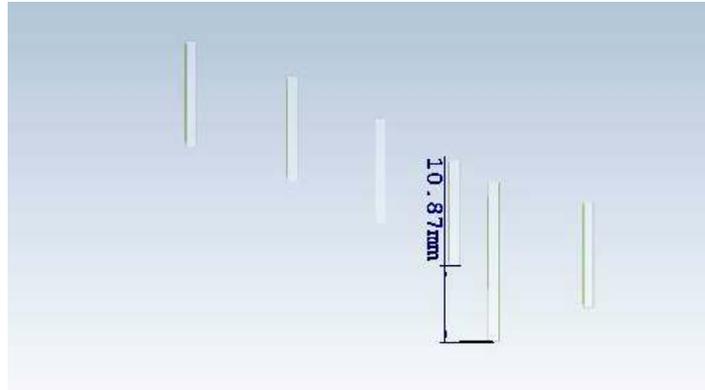
**Figura 4. 11** Distribución de los elementos conductores respecto al elemento conductor

Una vez que se ha definido el orden de las placas ahora es preciso indicar la distancia que las separa una de otra, esta distancia fue establecida en el Capítulo 2 en el que se diseñó la antena. En la Figura 4.12 se observa, lo anteriormente expuesto, la disposición de cada placa y su separación.

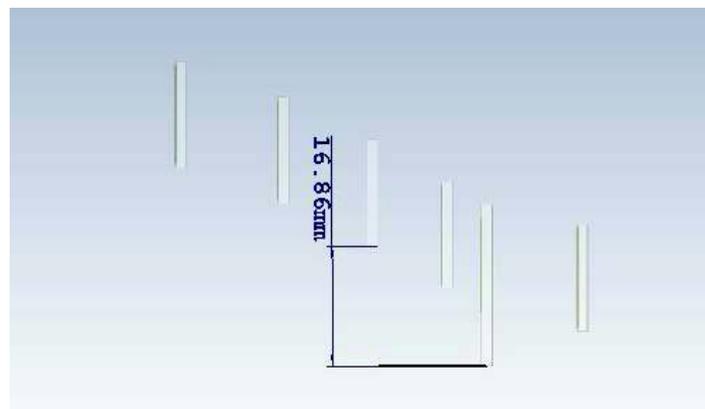


**Figura 4. 12** Separación entre elementos

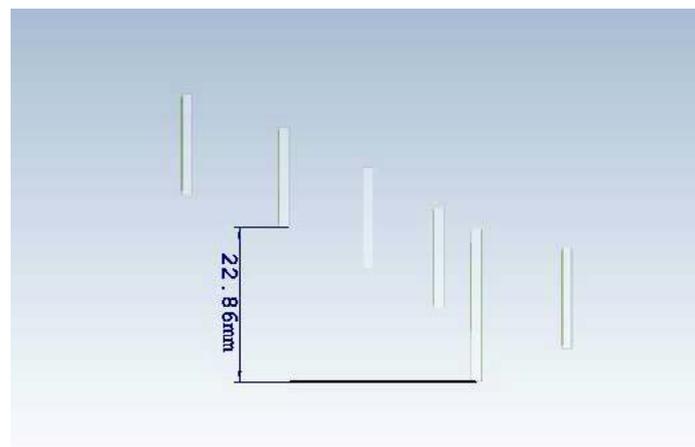
Ahora es importante indicar la distancia que tiene cada placa con respecto a un plano vertical, cada medida es diferente para cada elemento pasivo, las Figuras 4.13-4.16 muestran lo anteriormente mencionado.



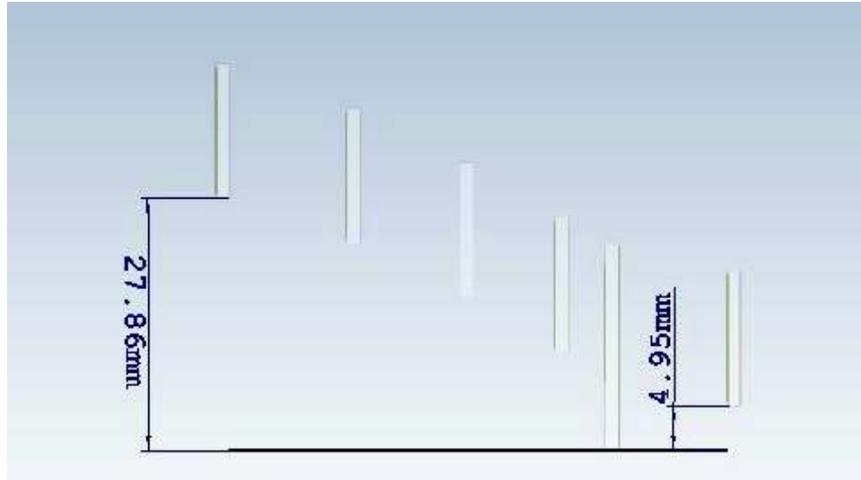
**Figura 4. 13** Distancia del primer elemento director respecto a la base de la antenna



**Figura 4. 14** Distancia del segundo elemento director respecto a la base de la antenna



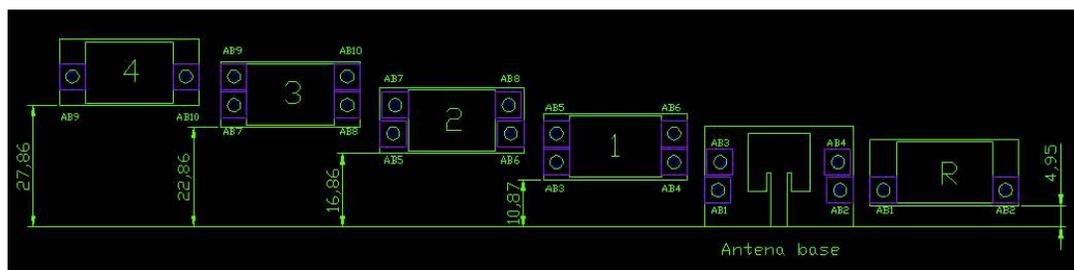
**Figura 4. 15** Distancia del tercer elemento director respecto a la base de la antenna



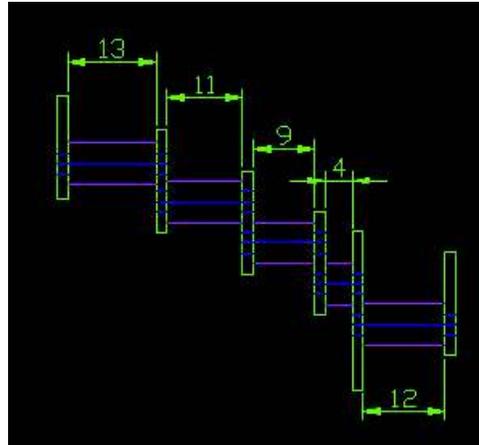
**Figura 4. 16** Distancia del cuarto elemento director y del reflector respecto a la base de la antena

Las mediciones de los elementos directores respecto a la base de la antena se obtuvieron en base a pruebas en las que se variaba la altura de cada director con el fin de que la antena presente mejores resultados, tanto en ganancia como directividad.

Es necesario mencionar que para la antena se realiza el diseño de las perforaciones en las partes que no tienen cobre con el fin de colocar los separadores de placa a la altura diseñada con respecto a la antena base como se observa en la Figura 4.17, en la Figura 4.18 se observa como los separadores estarán ubicados en cada perforación con la distancia de separación entre placas.

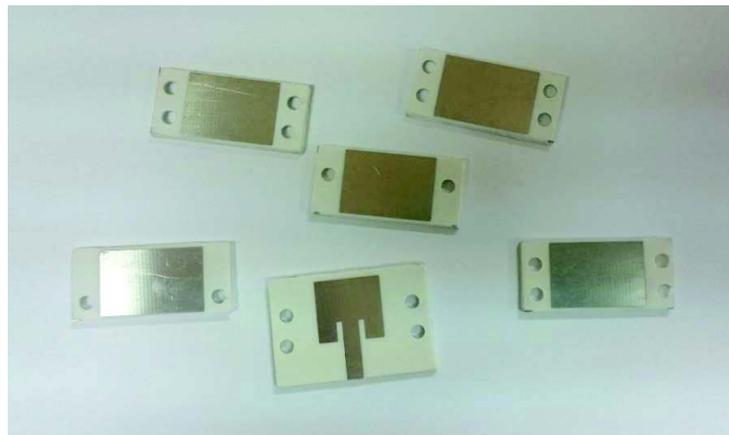


**Figura 4. 17** Diseño en Autocad de perforaciones para separaciones



**Figura 4. 18** Acoplamiento de placas respecto a separaciones y distancia respecto a la antena base

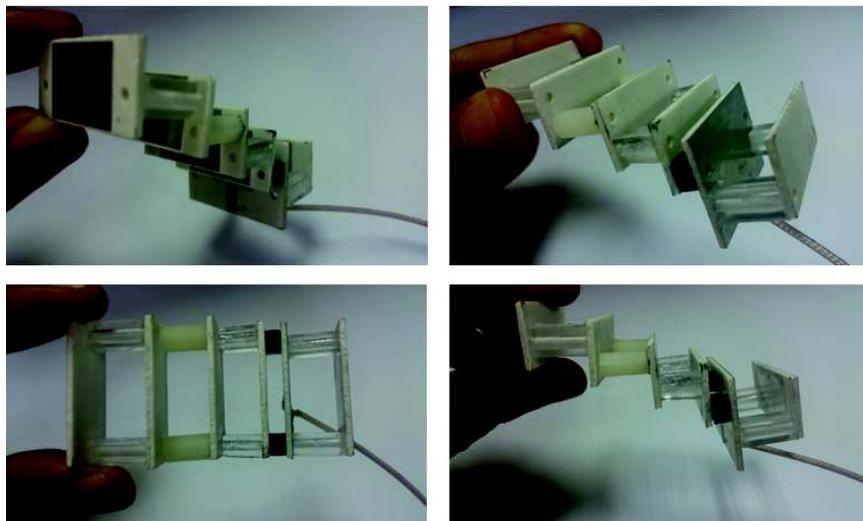
Una vez realizadas las perforaciones en las placas, se seleccionan los separadores adecuados para las mismas, además se realizó un revestimiento de estaño sobre el cobre de cada placa, con el fin de mantener las características conductoras, el estañado es resistente a la corrosión permitiendo que la placa de cobre con revestimiento de estaño dure hasta 10 veces más que los elementos no estañados [51], en la Figura 4. 19 se muestra las placas perforadas y el recubrimiento de estaño de la antena.



**Figura 4. 19** Elementos de la antena antes de ser armada

Se usó un calibrador pie de rey para medir las distancias entre placas, debido a que las distancias son milimétricas y se requiere precisión en ellas.

En la Figura 4.20 se aprecia finalmente la antena, incorporados los separadores de placa plásticos, el cable coaxial y el respectivo conector sma.



**Figura 4. 20** Antena Yagi

#### 4.2.1 COSTO DE LA ANTENA

Para obtener el costo total de la antena se desglosa el valor de cada elemento adquirido en la construcción de la misma, los valores por elemento se presenta en la Tabla 4.1.

La lámina RO4003c se comercializa en tamaño de 12"x18" de la cual se obtienen alrededor de 150 placas para 25 antenas.

**Tabla 4. 1** Costo de la antena microstrip Yagi

| <b>CANTIDAD</b> | <b>DESCRIPCIÓN</b>                                  | <b>VALOR UNITARIO(\$)</b> | <b>TOTAL(\$)</b> |
|-----------------|---|---------------------------|------------------|
| 1               | Lámina RO4003c Standard<br>Thickness 0.060"         | 13.22                     | 13.22            |
| 1               | Cable MMCX conector SMA<br>Hembra Ubiquiti Mikrotik | 20                        | 20               |
| 2               | Espaciadores 4mm                                    | 0.20                      | 0.40             |
| 2               | Espaciadores 9mm                                    | 0.25                      | 0.50             |
| 2               | Espaciadores 11mm                                   | 0.30                      | 0.60             |
| 2               | Espaciadores 12 mm                                  | 0.30                      | 0.60             |
| 2               | Espaciadores 13mm                                   | 0.32                      | 0.64             |
| 1               | Impresión y cortado de placa                        | 4.09                      | 4.09             |
| <b>TOTAL</b>    |   |                           | <b>40.05</b>     |

### 4.3 DESARROLLO DE PRUEBAS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Las pruebas a realizarse con los equipos son: medición de potencia de transmisión, impedancia de la antena, VSWR y pérdidas de retorno. Los equipos necesarios para ejecutar las pruebas son: generador de RF, analizador de espectros y un analizador vectorial, todos estos equipos operan a la frecuencia de 5.8 GHz.

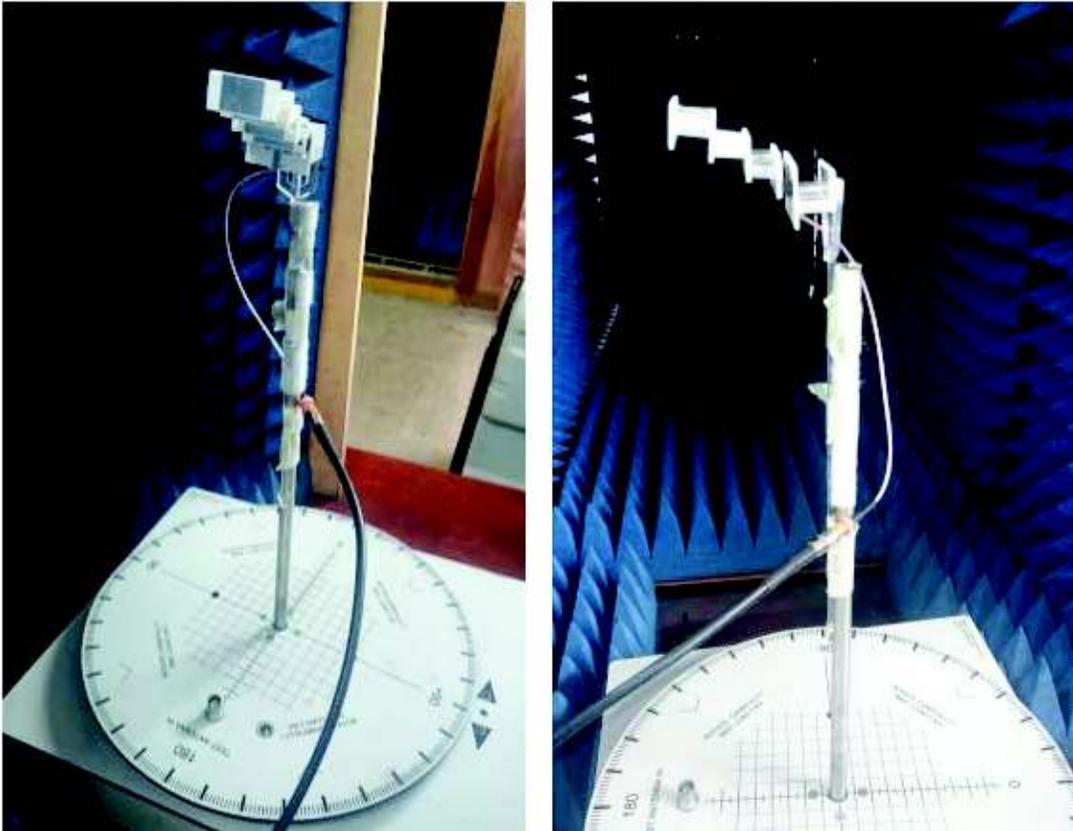
El analizador de espectros Aaronia HF-60105, que se observa en la Figura 4.21, opera en el rango frecuencia de 1 MHz a 9.4 GHz, este analizador de espectros cuenta con una impedancia de  $50 \Omega$  a la entrada de la antena, además cuenta con una antena log periódica direccional que opera a altas frecuencias de 680 MHz a 10 GHz [52], la cual nos servirá como antena receptora en las pruebas a realizar a continuación.



**Figura 4. 21** Analizador de espectros Aaronia HF-60105

Las mediciones de potencia transmitida fueron realizadas dentro de una cámara anecoica ubicada en el Laboratorio de Antenas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional.

Dentro de la cámara anecoica existe una plataforma giratoria con un soporte de material no conductor, a fin que no influya en las mediciones, en éste soporte se coloca la antena como muestra la Figura 4.22, y se tomará el valor de potencia que transmita a una antena receptora cada  $5^\circ$ .



**Figura 4. 22** Antena Yagi sujeta al soporte en la plataforma giratoria

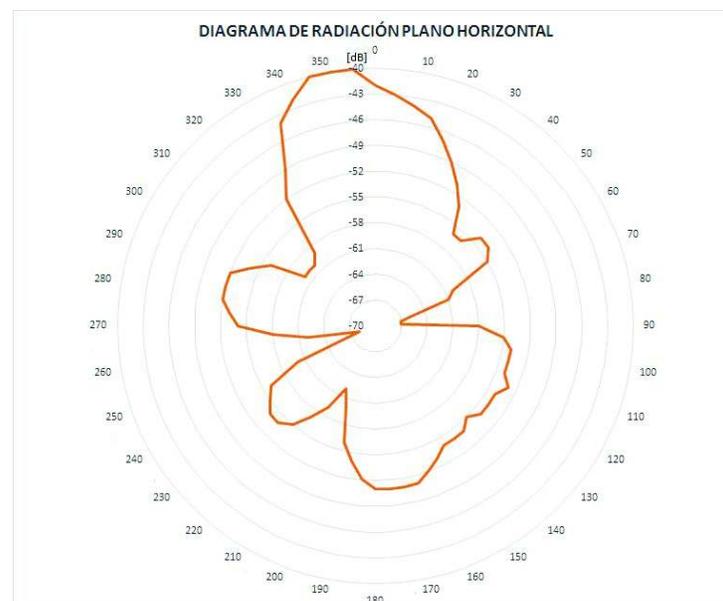
Mediante el Generador RF Anritsu MG3961C se energiza la antena a la frecuencia de 5.8 GHz, de esta manera la antena funciona como transmisor, la antena log periódica hará el papel de receptor captando la potencia emitida, el receptor está ubicado al otro extremo de la cámara. Estos valores serán tomados por el analizador de espectros para finalmente graficar el lóbulo de radiación de la antena diseñada.

La puesta a prueba se evidencia en la Figura 4.23 en donde se observa el generador conectado al transmisor y la antena log periódica al otro extremo de la cámara como antena receptora y conectada al analizador de espectros.

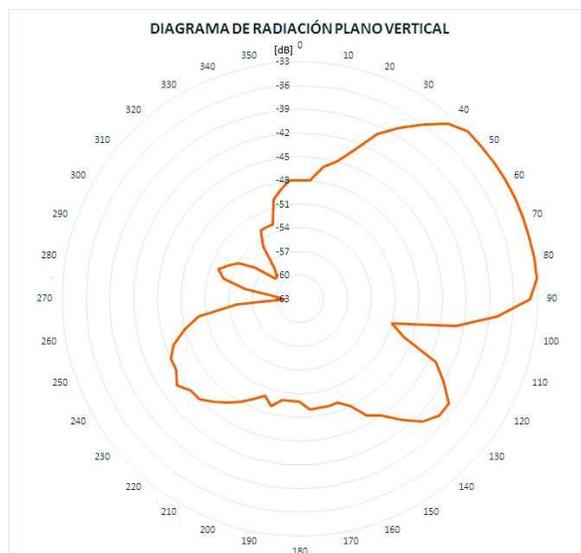


**Figura 4. 23** Puesta a prueba en la Cámara Anecoica

En la Figura 4.24 se observan las mediciones de potencia en el plano polar que representa el diagrama de radiación en el plano horizontal, de igual forma se realizó mediciones en el campo vertical obteniendo los resultados mostrados en la Figura 4.25:



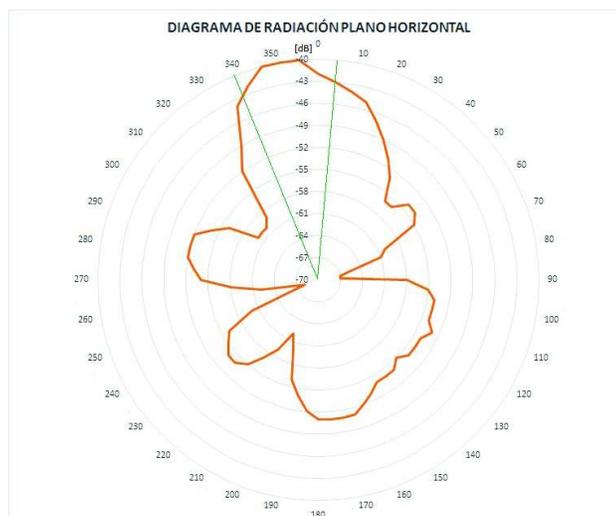
**Figura 4. 24** Diagrama de Radiación en el Plano horizontal de la Antena Yagi con los elementos directores ubicados uno más arriba que otro



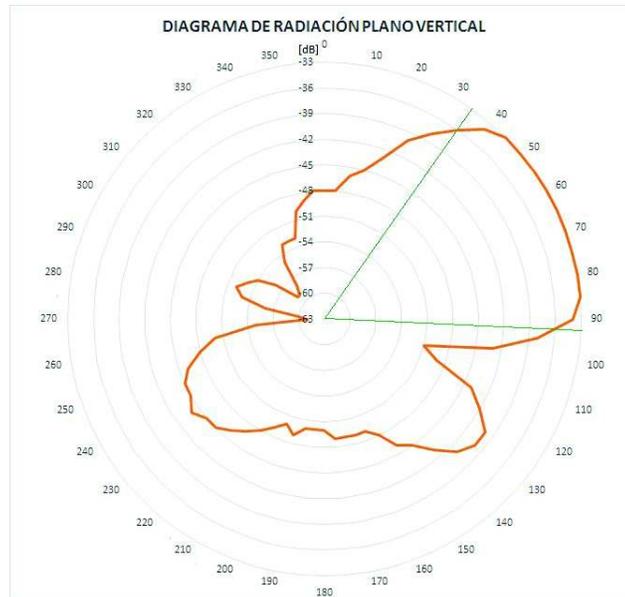
**Figura 4. 25** Diagrama de Radiación en el Plano vertical de la Antena Yagi con los elementos directores ubicados uno más arriba que otro

En el diagrama de radiación en el plano horizontal en la Figura 4.24 se divide el lóbulo principal y los lóbulos secundarios característicos de la antena Yagi.

A partir de las gráficas obtenidas anteriormente se calcula la directividad y ganancia de la antena diseñada para lo cual se determina el valor de los ángulos que tiene el lóbulo principal en los puntos de media potencia (-3dB) del plano horizontal que se muestra en la Figura 4.26 y en el plano vertical mostrado en la Figura 4.27 siendo estos valores de  $29^\circ$  y  $58^\circ$  respectivamente.



**Figura 4. 26** Diagrama de radiación en el plano Horizontal en los puntos de media potencia



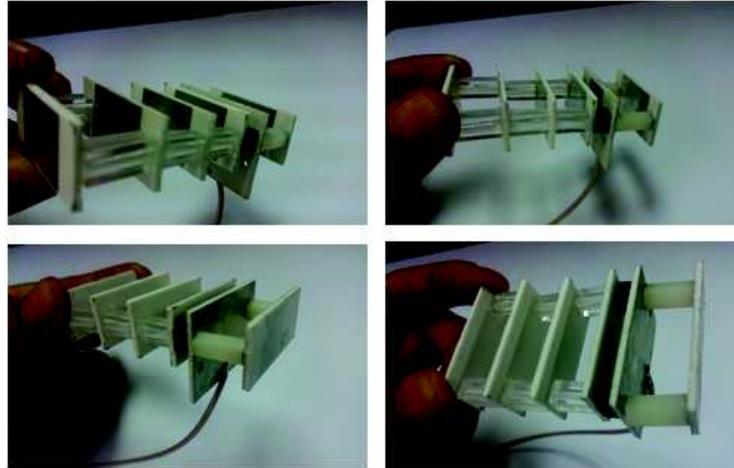
**Figura 4. 27** Diagrama de radiación en el plano Vertical en los puntos de media potencia

Se determina que la directividad que proporciona la antena diseñada en base a la ecuación (1.7), es de 13,8963 dBi y una ganancia de 13,8963 dB de acuerdo a la ecuación (1.10).

Se puede apreciar que los valores obtenidos de directividad y ganancia en las pruebas realizadas son mayores a los que se obtuvieron en la simulación, esto puede deberse a que los valores de constantes de permitividad y otros parámetros que tienen las librerías de los sustratos que dispone el software de simulación usado, no son exactamente los mismos que los materiales que se disponen en el mercado.

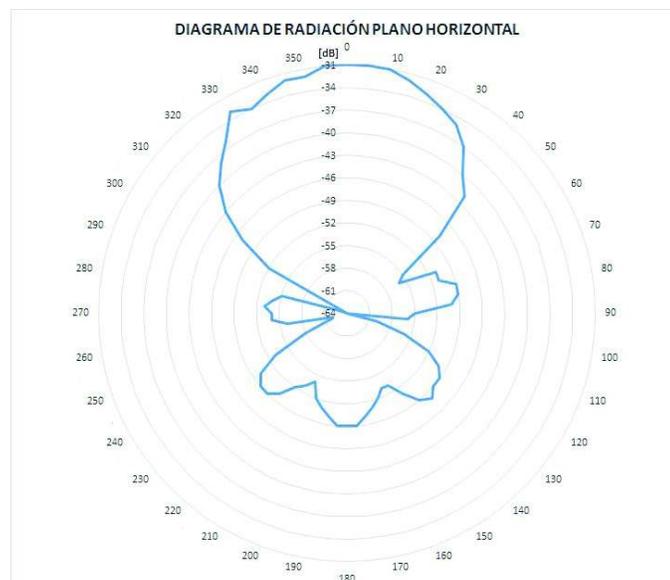
La gráfica del diagrama de radiación en el plano vertical en la zona de mayor potencia presenta la orientación del lóbulo principal al lado derecho, esto se debe a la disposición de los elementos directores.

Para direccionar de mejor manera la radiación de la antena se procedió a realizar pruebas en la cámara anecoica variando la posición de los directores, ubicándolos uno frente a otro y al mismo nivel respecto a un mismo plano como se muestra en la Figura 4.28.



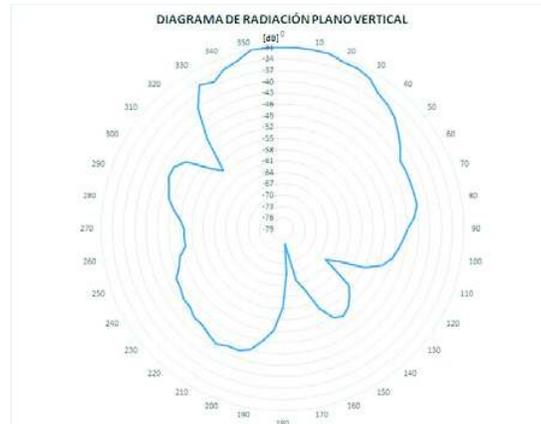
**Figura 4. 28** Antena con directores dispuestos a la misma altura

La toma de mediciones de potencia se realizó cada 5 grados. La Figura 4.29 muestra el lóbulo de radiación de la segunda antena Yagi mencionada en el párrafo anterior, en la que se muestra claramente que el lóbulo principal posee un haz de radiación más grande en comparación que la antena anterior, se evidencia una directividad menor por la forma del lóbulo mostrado, el ángulo formado respecto a los puntos de media potencia es de  $51^\circ$ , siendo mayor el ángulo del lóbulo de radiación respecto a la antena anteriormente analizada en el plano horizontal.



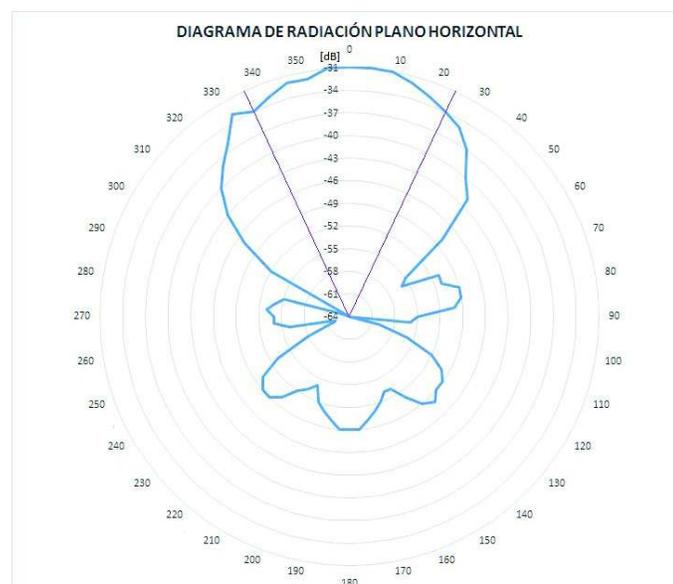
**Figura 4. 29** Diagrama de Radiación en el Plano horizontal de la Antena Yagi con los elementos directores ubicados en la misma posición respecto a un plano

La Figura 4.30 muestra el diagrama de radiación en el plano vertical en donde se ve la orientación presentada en la antena anterior solo que en menor proporción, se puede decir que el lóbulo está más orientado a la posición de 0 grados.

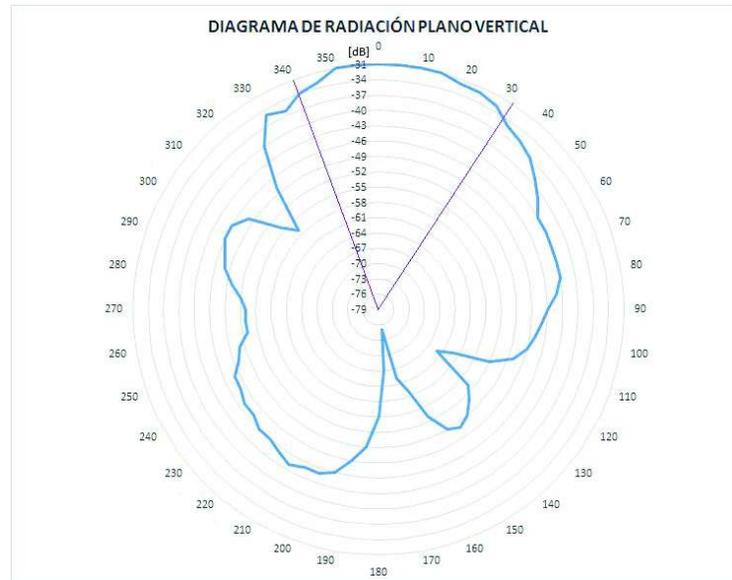


**Figura 4. 30** Diagrama de Radiación en el Plano vertical de la Antena Yagi con los elementos directores ubicados en la misma posición respecto a un plano

El haz de radiación tanto en el plano horizontal y en el plano vertical tiene un ángulo de  $51^\circ$  y de  $52^\circ$  respectivamente respecto a los puntos de media potencia que se muestran en el plano horizontal, Figura 4.31 y en el plano vertical, Figura 4.32.



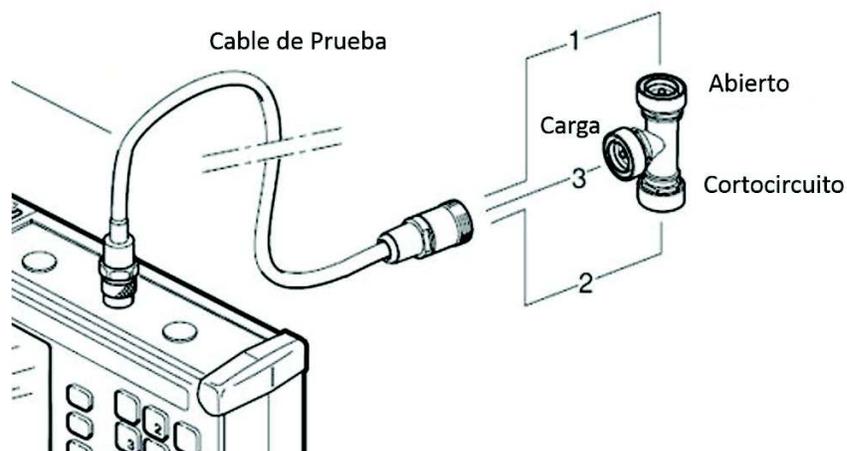
**Figura 4. 31** Diagrama de Radiación de la antena Yagi con los directores a la misma altura en el plano horizontal



**Figura 4. 32** Diagrama de Radiación de la antena Yagi con los directores a la misma altura en el plano vertical

La directividad calculada en base a los ángulos que forma el haz a -3 dB en los planos horizontal y vertical es de 11,9188 dBi y una ganancia de igual valor debido a que la directividad y ganancia son aproximadamente iguales.

Para medir otros parámetros de la antena se utilizó el Analizador Vectorial Keysight FieldFox RF Analyzer N9914A con frecuencia de operación máxima de 6.5 GHz [53], antes de realizar las mediciones propuestas se debe calibrar el equipo que conecta el equipo a la antena diseñada, la calibración se realiza en corto circuito, en circuito abierto y con carga de  $50 \Omega$  como se puede ver en la Figura 4.33.



**Figura 4. 33** Método de calibración de equipo [54]

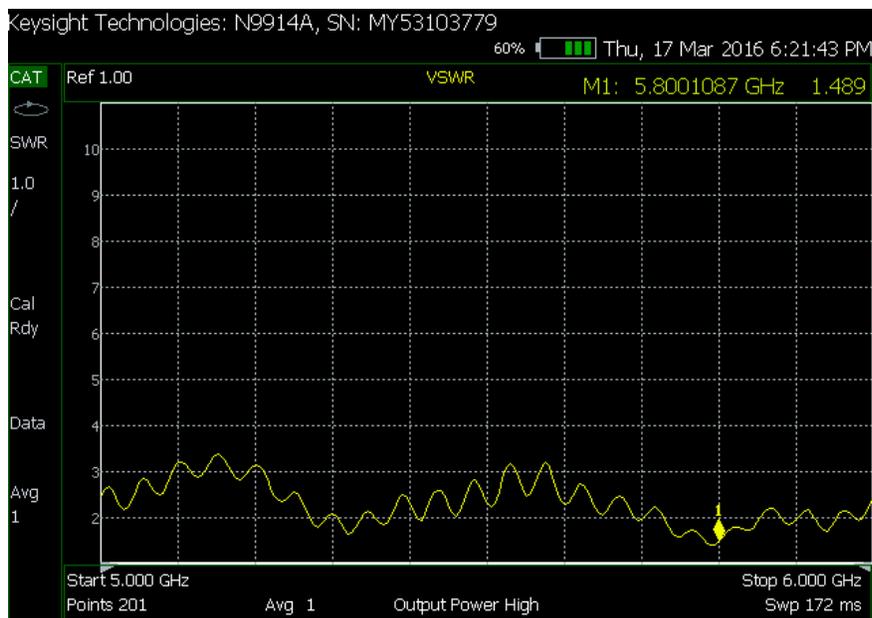
Debido a las interferencias del ambiente se aisló la antena lo máximo posible, colocando la antena en un lugar donde no transiten personas y no estén funcionando otros equipos que puedan causar interferencia durante las mediciones, como se muestra en la Figura 4.34, además del cable propio del analizador vectorial se introdujo un pigtail debido a que no se disponía de un acoplador de conector bnc a sma.

Una vez que el equipo esté calibrado se conecta el pigtail, al no disponer de una T para calibrar cable con conector sma se realizó el siguiente procedimiento: en circuito abierto no se conectó nada, en cortocircuito mediante un pedazo de cable se realizó un corto en el conector y finalmente para conectar a una carga se introdujo una resistencia de  $50 \Omega$ , de esta manera se realizó la calibración del equipo de extremo a extremo para ser conectado a la antena diseñada.



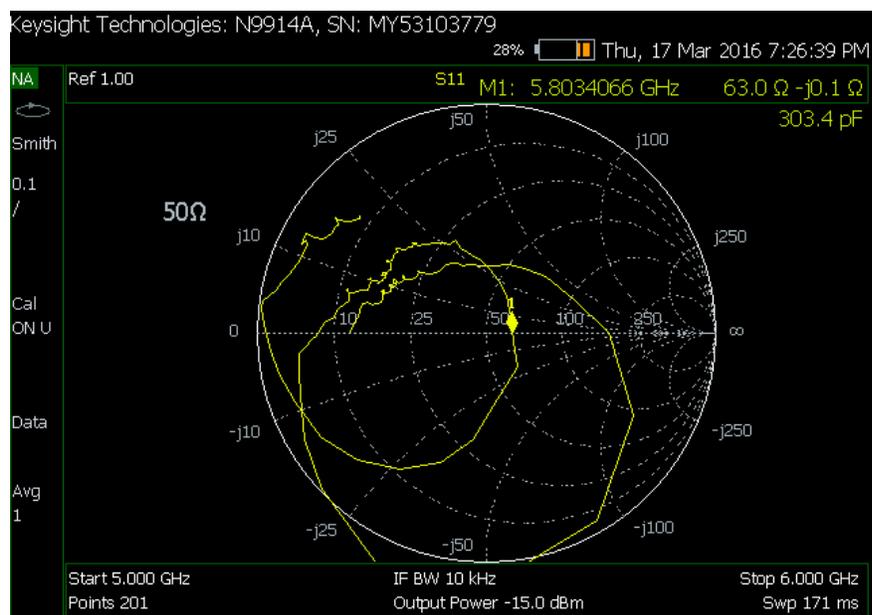
**Figura 4. 34** Antena de prueba conectada al Analizador Vectorial

El rango de frecuencia de análisis fue de 5 a 6 GHz, el primer parámetro a medir fue el VSWR como se muestra en la Figura 4.35. De las mediciones realizadas con el analizador se obtuvo un valor de 1.489 siendo un valor muy cercano al que se obtuvo en la simulación de 1.179 un valor muy bueno dentro del rango de aceptación del parámetro VSWR.



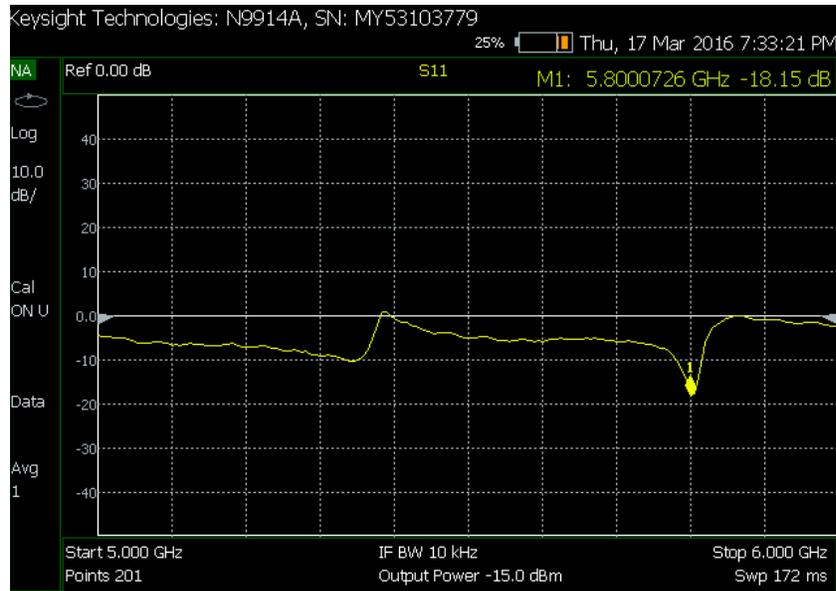
**Figura 4. 35** VSWR a la frecuencia de 5.8 GHz

El valor de impedancia de la antena medido fue de  $63-j0.1 \Omega$ , en el que se evidencia una parte reactiva aproximadamente nula, representado en la carta de Smith como se observa en la Figura 4.36, a la frecuencia de 5.8 GHz.



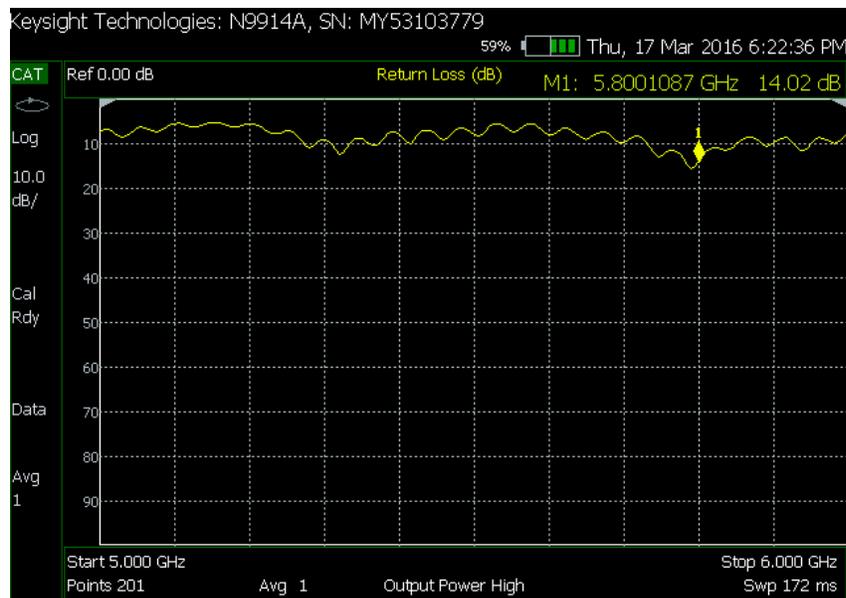
**Figura 4. 36** Impedancia de la antena a la frecuencia de 5.8 GHz

El valor más bajo que se obtuvo en los parámetros S está localizado en la frecuencia de 5.8 GHz con -18.15 dB como se puede observar en la Figura 4.37.



**Figura 4. 37** Parámetros S

Se midió también las pérdidas por retorno de la antena que se obtienen a la frecuencia de diseño teniendo como resultado 14,02 dB como se muestra en la Figura 4.38.



**Figura 4. 38** Pérdidas por Retorno

Cabe recordar que las pérdidas por retorno indica la cantidad de energía perdida en la carga, en la Tabla 4.1 se muestra una tabla de referencia de varios parámetros establecidos como el VSWR y pérdidas por retorno.

**Tabla 4. 2** Tabla de Referencia entre Pérdidas por retorno y VSWR [3]

| $L_{RT}(dB)$ | VSWR     | Nota                      |
|--------------|----------|---------------------------|
| 0            | $\infty$ | Circuito Abierto          |
| 3            | 5.8470   | Retorno de media potencia |
| 6            | 3.0096   |                           |
| 10           | 1.9248   | Aproximadamente VSWR = 2  |
| 20           | 1.2222   |                           |
| 30           | 1.0653   |                           |
| 40           | 1.0202   |                           |
| $\infty$     | 1        | Acoplamiento              |
| 40           | 1.0202   |                           |
| 30           | 1.0653   |                           |
| 20           | 1.2222   |                           |
| 10           | 1.9248   | Aproximadamente VSWR = 2  |
| 6            | 3.0096   |                           |
| 3            | 5.8470   | Retorno de media potencia |
| 0            | $\infty$ | Corto Circuito            |

En base a la Tabla 4.2, con un valor de pérdidas por retorno obtenido de 14,02 se debería obtener un VSWR de 1,5032, valor aproximadamente igual al valor que se registró en el Analizador vectorial utilizado en las pruebas de laboratorio que es de 1,489.

#### **4.4 PROBLEMAS QUE SE PRESENTAN EN EL DISEÑO A ALTAS FRECUENCIAS**

A la frecuencia de 5.8 Ghz la longitud de onda obtenida se encuentra en el orden de decenas de milímetros por lo que se espera que las dimensiones de la antena sean milimétricas que es una ventaja de trabajar a este tipo de frecuencias, el inconveniente que se observó está relacionado con la construcción de la antena ya que se necesita de precisión al momento de elaborar la misma, el diseño en el software no es un problema ya que éste permite trabajar con tamaños milimétricos.

Otro inconveniente presente es que a mayor frecuencia de diseño mayores son los costos de construcción, debido a que los materiales usados son mejor elaborados tanto para placas como para cables de conexión.

#### **4.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE OPERAR A LA FRECUENCIA DE 5.8GHZ**

Las ventajas encontradas en la ejecución del proyecto fueron que al diseñar la antena a la frecuencia de 5.8 GHz permite tener un tamaño compacto, la longitud de onda está en el orden de decenas de milímetros y se logra obtener valores de directividad y ganancia elevados.

El operar a esta frecuencia permite tener un tráfico alto de datos a una velocidad de transferencia elevada debido a la frecuencia de operación, a mayor frecuencia mayor velocidad de transmisión.

La frecuencia de 5.8 GHz está dentro del rango de operación de la banda UWB (*Ultra Wide Band*, Banda Ultra Ancha) en la que se enfocan varias aplicaciones como: comunicaciones, sensores y radares [55].

Adicionalmente, otras ventajas a esta determinada frecuencia son que permiten operar a frecuencias que no producen daño al tejido humano, es decir permiten operar en redes WBAN. Las aplicaciones en este tipo de redes se caracterizan por su baja potencia y por su tamaño compacto facilitando así su uso y manejo.

Pueden ser implantados o puestos sobre el cuerpo humano con lo que se puede obtener un sistema inteligente de salud.

Las desventajas encontradas fueron que mientras las antenas son diseñadas a frecuencias elevadas el diseño se encarece debido a que las placas son fabricadas con el fin de dar máxima conductividad y bajas pérdidas siendo el sustrato de mejores características y en consecuencia el costo del material se eleva.

Además que al ser la antena de tamaño pequeño el diseño del elemento radiante se dificulta al momento de realizar la impresión en la placa, por lo que se requiere de una máquina especial para el grabado del diseño en el cobre.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Una vez realizado el estudio científico que comprende el diseño, simulación e implementación de una antena Yagi microstrip, en base a los resultados obtenidos se procederá en este capítulo a presentar las conclusiones del proyecto de titulación, además de recomendaciones que servirán para tomar en consideración en proyectos futuros.

#### **5.1 CONCLUSIONES**

- Existen diferentes tipos de antenas cada una diseñada con un fin común el transmitir o recibir ondas electromagnéticas, su tamaño y forma varían de acuerdo a su aplicación.
- La antena Yagi-Uda tiene como característica principal el ser directiva y aumentar su ganancia conforme al número de elementos directores que la misma posea, entre más número de directores la directividad y ganancia aumentan.
- Mediante la simulación de los métodos de diseño de la antena Yagi microstrip se logró determinar el que brinde los mejores resultados tanto en directividad como en ganancia, la diferencia de tamaño de los elementos directores de un diseño y del otro es mínima, lo que varía es la separación entre ellos, estas separaciones se diseñaron en base a unas pruebas de campo y en base a ecuaciones de una calculadora Yagi.
- El método de diseño seleccionado como más adecuado es el método de diseño mediante ecuaciones de una calculadora Yagi, debido a que esta toma en cuenta los parámetros del diámetro del elemento, en este caso se consideró el ancho de la placa, determinando este método como el más exacto y el más cercano a la realidad.

- Por medio de la simulación se evidenció la respuesta de la antena, el elemento conductor emitía cierta directividad que iba aumentando luego de colocar los elementos directores uno tras otro. Cada vez que un elemento director se añade se debe ir ajustando las medidas del elemento radiante, ya que al ser el director un elemento conductor interfiere en los parámetros de la antena, como el acoplamiento de la impedancia con la línea de transmisión; estos ajustes son mínimos ya que la interferencia no es muy grande y los valores de los parámetros se mantienen dentro del rango de aceptación, se realiza un ajuste con el fin de optimizar la antena diseñada.
- El VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*) obtenido en las pruebas de laboratorio de 1.4 se acerca al valor ideal de 1 con una carga de  $50\Omega$  lo que indica que el acoplamiento de impedancia con la línea de transmisión es adecuado, cabe mencionar que el VSWR en cortocircuito y circuito abierto es infinito y que los valores con carga son aceptables con un valor por debajo de 2.
- La cámara anecoica permite realizar mediciones sin la presencia de reflexiones debido al material con el que están recubiertas sus paredes, las medidas tomadas cada 5 grados permitieron tener una aproximación del diagrama de radiación de la antena diseñada, si estas mediciones se las hubiera realizado en el exterior de la cámara, la potencia transmitida sería muy baja debido a las interferencias en el medio.
- En las mediciones realizadas dentro de la cámara anecoica con los directores dispuestos uno más arriba que otro, en el plano horizontal el lóbulo de radiación presenta una orientación hacia la derecha, esto se atribuye a la disposición de los elementos pasivos.
- Las ventajas que se encuentran al operar en la banda de 5,8 GHz son que permite transmitir datos a grandes velocidades y es un canal de gran capacidad, además que esta frecuencia se encuentra en la banda para aplicaciones industriales, científicas y médicas, conocida como ISM.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- Cuando se va a seleccionar el tipo de sustrato es conveniente revisar las especificaciones de cada tipo de placa, debido a que cada una es diseñada para un rango de frecuencias determinado que permite tener la mayor transmisión de potencia a la frecuencia de diseño.
- Cuando se procede a realizar la simulación en el software seleccionado se debe revisar que las librerías de los sustratos estén actualizadas de manera que no influya en los resultados al momento de construir la antena.
- Se puede cubrir el cobre con una capa de estaño esmaltado a fin de evitar la corrosión del cobre y conservar las características de conducción y alargar el tiempo de vida útil de la antena.
- Al momento de realizar mediciones, es importante aislar la antena de modo que no exista interferencia que pueda causar reflexiones, ya que estas interferencias alterarán los valores de los parámetros de la antena a ser medidos.
- Antes de realizar mediciones en el Analizador Vectorial se debe realizar la calibración de extremo a extremo desde el equipo hasta el cable que se conectará a la antena.

## Bibliografía

- [1] IEEE, «IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas,» [En línea]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=30651&isnumber=1290>. [Último acceso: 04 02 2015].
- [2] C. A. Balanis, Antenna Theory, New Jersey: Wiley-Interscience, 2005.
- [3] Y. Huang y K. Boyle, Antennas from theory to practice, Reino Unido: Wiley, 2008.
- [4] F. Curotto, S. Espinosa y M. Vergara, «Antenas, Polarización y Diagramas de Radiación,» 2012.
- [5] Antenna Theory, «Beamwidths and Sidelobe Levels,» [En línea]. Available: <http://www.antenna-theory.com/basics/radPatDefs.php>. [Último acceso: 12 08 2015].
- [6] Á. Cardama Aznar, L. J. Roca y J. M. Rius Casals, Antenas, Edicions UPC, 2002.
- [7] dspace, «CAPITULO 1 FUNDAMENTOS DE ANTENAS,» [En línea]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15/8/Capitulo1.pdf>. [Último acceso: 04 02 2015].
- [8] MP antenna, «Omnidirectional Antenna Radiation,» MP antenna blog, [En línea]. Available: <http://www.mpantenna.com/omnidirectional-antenna-radiation-patterns/>. [Último acceso: 22 08 2015].
- [9] J. Monsalve, «Antenas una explicación de su funcionamiento (II),» diarioelectronicohoy.com, 24 06 2011. [En línea]. Available: <http://www.diarioelectronicohoy.com/antenas-una-explicacion-de-su-funcionamiento-ii/>. [Último acceso: 25 08 2015].
- [10] blogspot, 09 05 2013. [En línea]. Available: <http://m.forocoches.com/foro/showthread.php?t=3248854>. [Último acceso: 10 02 2015].
- [11] E. Aroni, «Antenas (Redes Inalámbricas),» Blogspot, 29 06 2012. [En línea]. Available: <http://dciearoni00002.blogspot.com/2012/06/antenas-redes-inalambricas.html>. [Último acceso: 10 02 2015].

- [12] P. Mediavilla Salcedo, «Sensores de Microondas para la Detección de Materiales de Alta Constante Dieléctrica,» Cantabria, 2012.
- [13] J. Lsewhere, «Linear, Circular an Elliptical Polarization Animation in a Single Shot,» Scientiflix, 26 07 2011. [En línea]. Available: <http://scientiflix.com/post/8091674698/linear-circular-and-elliptical-polarization-animation-in>. [Último acceso: 20 09 2015].
- [14] W. Tomasi, Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, México: Pearson Educación, 2003.
- [15] T. S. Bird, «Definition and Misuse of Return Loss,» IEEE Antennas & Propagation Magazine, Australia, 2009.
- [16] M. Pristin K, «A Three Element Yagi Uda Antenna for RFID Systems,» Coimbatore.
- [17] A. Muhammad Luqman, L. Abdul Mukhlishiina, A. R. Raja Ammar, A. M. Ahmad Zaim, A. Muhd y M. Y. Muhammad Nawawi, «Yagi-Uda Antenna Design».
- [18] J. Moukd, «Moukd,» Amateur Radio blog, projects and electronics, [En línea]. Available: <http://m0ukd.com/homebrew/antennas/144mhz-2m-portable-yagi-vhf-beam-antenna/>. [Último acceso: 25 09 2015].
- [19] E. Hala, «Microstrip Antennas for Mobile Wireless Communication Systems,» InTech, Egypt, 2010.
- [20] K. R. Carver y J. W. Mink, «Microstrip Antenna Technology,» IEEE, New Mexico State Univ., Las Cruces, NM, USA, 1981.
- [21] A. Sabban, «A Comprehensive study of losses in mm-wave Microstrip antenna arrays».
- [22] N. Charles U. y O. Adetokunbo O., «Selecting Best Feeding Technique of a Rectangular Patch Antenna for an Application,» Scientific & Academic Publishing, 2015. [En línea]. Available: <http://article.sapub.org/10.5923.j.ijea.20150503.01.html>. [Último acceso: 02 05 2016].
- [23] R. De Salas Corregidor, «Diseño de una antena compacta implantable en bandas ISM y MICS,» Leganés, 2010.

- [24] J. Obenchain, «A Technical Assessment of Aperture coupled Antenna Technology,» Lynchburg, 2014.
- [25] Z. Wang, S. Fang y S. Fu, «Wideband dual-layer patch antenna fed by a modified L-strip,» São Caetano do Sul, 2010.
- [26] R. Sastry y J. Sankar, «Proximity Coupled Rectangular Microstrip Antenna with X-slot for WLAN Application,» *Global Journals of Researches in Engineering*, vol. 14, nº 1, p. 15, 2014.
- [27] PPG Aerospace, «Tapered Anechoic Chamber,» PPG Aerospace Cuming-Lehman Chambers, 2015. [En línea]. Available: <http://cuminglehman.com/products/hf-chambers/tapered-chamber/>. [Último acceso: 04 01 2016].
- [28] J. Harrison Kurunathan, «Study and overview on WBAN under IEEE 802.15.6,» Porto, 2015.
- [29] S. I. Alvarado León y D. A. Juárez Cuevas, «Redes de Area Corporal en el cuidado de la Salud,» México, 2012.
- [30] V. Custodio, F. J. Herrera, G. López y J. I. Moreno, «A Review on Architectures and Communications Technologies for Wearable Health-Monitoring Systems,» Leganés, 2012.
- [31] X. Wu, «Antennas and Propagation for body area Networks at 60 GHz,» Birgmingham, 2013.
- [32] Y. Mehmet R, *Ultra-Wideband and 60 GHz Communications for Biomedical Applications*, Australia: Springer, 2014.
- [33] N. d. R. Arenas Paz, «Revelado de huellas lofoscòpicas en papel,» monografias.com, [En línea]. Available: <http://www.monografias.com/trabajos57/huellas-lofoscopicas/huellas-lofoscopicas3.shtml>. [Último acceso: 13 09 2015].
- [34] D. B. Smith, D. Miniuti, T. A. Lamahewa y L. W. Hanlen, «Propagation Models for Body Area Networks: A Survey and New Outlook,» Draft, 2012.
- [35] A. A. Younis Ibraheem, «Implanted Antennas and Intra-Body Propagation Channel for Wireless Body Area Network,» Blacksburg, Virginia, 2014.

- [36] Pasternack The Engineer's RF Source, «Microstrip Patch Antenna Calculator,» [En línea]. Available: <https://www.pasternack.com/t-calculator-microstrip-ant.aspx>. [Último acceso: 2 10 2015].
- [37] R. Blog, «FR-4 Versus High Frequency Laminates,» 08 03 2010. [En línea]. Available: [http://mwexpert.typepad.com/rog\\_blog/2010/08/fr4-versus-highfrequency-laminates.html](http://mwexpert.typepad.com/rog_blog/2010/08/fr4-versus-highfrequency-laminates.html). [Último acceso: 02 08 2015].
- [38] CST, «CST-Computer Simulation Technology,» CST Computer Simulation Technology AG, 2015. [En línea]. Available: <https://www.cst.com/Products/CSTS2>. [Último acceso: 01 07 2015].
- [39] Rogers Corporation, «RO4003C Laminates,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.rogerscorp.com/acs/products/54/ro4003c-laminates.aspx>. [Último acceso: 02 08 2015].
- [40] Rogers Corporation, «RT/duroid 5870/5880 High Frequency Laminates,» 2015. [En línea]. Available: [www.rogerscorp.com/documents/606/acm/RT-duroid-5870-5880-Data-Sheet.pdf](http://www.rogerscorp.com/documents/606/acm/RT-duroid-5870-5880-Data-Sheet.pdf). [Último acceso: 02 08 2015].
- [41] S. García Marín, «Estudio de las tendencias actuales en el diseño de antenas para nuevos terminales móviles de cuarta generación,» Valencia, 2014.
- [42] P. P. Viezbiche, «Yagi Antenna Design,» *NBS Technical Note 688*, pp. 6-9, 1976.
- [43] D. D. Tanner, «DL6WU Long boom Yagi design tools,» [En línea]. Available: <http://www.dxzone.com/dx19827/dl6wu-long-boom-yagi-design-tools.html>. [Último acceso: 04 05 2015].
- [44] Agilent Technologies, «Advanced Design System,» *Agilent EEsof EDA*, n° 5988-3326EN, pp. 3-4, 2014.
- [45] Keysight Technologies, «Advances Design System (ADS),» Keysight Technologies 2000-2016, [En línea]. Available: <http://www.keysight.com/en/pc-1297113/advanced-design-system-ads?nid=-34346.0&cc=EC&lc=eng>. [Último acceso: 04 09 2015].
- [46] Dassault Systemes, «CST,» Dassault Systemes, U.S.A, 2014.
- [47] Altair, «FEKO,» Altair HyperWorks, 2015. [En línea]. Available: <http://www.feko.info/product-detail/overview-of-feko>. [Último acceso: 01 07 2015].

- [48] Altair, «FEKO Benefits,» Altair HyperWorks, 2015. [En línea]. Available: [http://www.altairhyperworks.com/HWTemp3Product.aspx?product\\_id=73&item\\_name=Benefits](http://www.altairhyperworks.com/HWTemp3Product.aspx?product_id=73&item_name=Benefits). [Último acceso: 01 07 2015].
- [49] Koax24 Kabelkonfektion, «Cable Coaxial RG316/C/50Ω,» Koax24 Kabelkonfektion, [En línea]. Available: <http://www.koax24.de/es/cable-coaxial/vista-general-50-ohm/24-32-mm-gr2/rg316-c.html>. [Último acceso: 2016 02 11].
- [50] antennas.us, «antennas.us,» [En línea]. Available: <http://www.myerseng.com/coaxial-cables/Coaxial-Cables-Atten-metric-26k.gif>. [Último acceso: 1 12 2015].
- [51] R. Friedkin, «Difference in Tinned and Non-Tinned Wire,» eHow, [En línea]. Available: [http://www.ehow.com/info\\_12033485\\_difference-tinned-nontinned-wire.html](http://www.ehow.com/info_12033485_difference-tinned-nontinned-wire.html). [Último acceso: 23 01 2016].
- [52] Aaronia, «Aronia AG,» 15 03 2016. [En línea]. Available: [http://www.aaronia.com/Datasheets/Spectrum\\_Analyzer/Spectrum\\_Analyzer\\_Aaronia\\_Spectran\\_HF-6000-Series.pdf](http://www.aaronia.com/Datasheets/Spectrum_Analyzer/Spectrum_Analyzer_Aaronia_Spectran_HF-6000-Series.pdf). [Último acceso: 10 03 2016].
- [53] Keysight, «Keysight Technologies,» 15 03 2016. [En línea]. Available: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5990-9783EN.pdf?id=2210837>. [Último acceso: 10 03 2016].
- [54] A. Zapata, «Uso del Site Master: VSWR y DTF,» El Blog de las Comunicaciones Móviles, 18 12 2012. [En línea]. Available: <http://blogcomunicacionesmoviles.blogspot.com/2012/12/uso-del-site-master-vswr-y-dtf.html>. [Último acceso: 18 05 2016].
- [55] U. Sana, A. Murad, H. Asdaque y S. K. Kyung, «Application of UWB Technology,» South Korea.
- [56] J. Anguera y A. Pérez, Teoría de Antenas.
- [57] I. Poole, «Antenna Resonance & Bandwidth,» [En línea]. Available: <http://www.radio-electronics.com/info/antennas/basics/resonance.php>. [Último acceso: 09 02 2015].