

# **CONSTRUCCIÓN DE UNA ANTENA MICROSTRIP ANILLO CIRCULAR**

**JOSE OSWALDO MOLINA GOMEZ  
JOSE ALBERTO GOMEZ TIBADUIZA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA-SECCIONAL BUCARAMANGA  
ESCUELA INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
BUCARAMANGA  
2013**

# **CONSTRUCCIÓN DE UNA ANTENA MICROSTRIP ANILLO CIRCULAR**

**JOSE OSWALDO MOLINA GOMEZ**

**JOSE ALBERTO GOMEZ TIBADUIZA**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título  
de**

**Ingeniero Electrónico.**

**Director**

**FABIO ALONSO GUZMÁN SERNA**

**Ingeniero Electrónico**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA-SECCIONAL BUCARAMANGA**

**ESCUELA INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**BUCARAMANGA**

**SEPTIEMBRE DEL 2013**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

**Firma del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

**Bucaramanga, septiembre del 2013**

A Dios por la salud y fortaleza, mis padres por apoyarme y acompañarme con tanto sacrificio y esperanza en cada paso que doy en la vida. Al profesor Fabio Guzmán Serna por la orientación y conocimientos brindados, demás profesores y compañeros de estudio.

José Oswaldo Molina Gómez

Agradezco a Dios, a mi familia por su sacrificio, por ser siempre fuente de inspiración. A Fabio Alonso Guzmán Serna por su conocimiento y orientación, a mi compañero de tesis José Oswaldo Molina. A todos mis demás profesores y amigos.

José Alberto Gómez Tibaduiza

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	13
1. OBJETIVOS .....	14
1.1. Objetivo General .....	14
1.2. Objetivos Específicos .....	14
2. MARCO TEORICO .....	15
2.1. INTRODUCCION .....	15
2.2. RESEÑA HISTORICA.....	15
2.3. PRINCIPIO DE OPERACIÓN DELAS ANTENAS .....	17
2.4. PARAMETROS DE LAS ANTENAS.....	18
2.5. TIPOS DE ANTENAS.....	30
2.6. TEORIA GENERAL DE LOS MODOS TRANSVERSAL MAGNETICO (TM).....	35
3. ANTEANS MICROSTRIP. ....	38
3.1. PROPAGACION ELECTROMAGNETICA EN ANTENAS MICROSTRIP .....	39
3.2. FRINGING FIELDS (EFECTOS DE BORDE).....	42
4. ANTEANA MICROSTRIP CON TOPOLOGIA ANILLO CIRCULAR .....	43
4.1. MODELO DE ANALISIS: .....	44
4.2. ALIMENTACION DEL PARCHE POR EL METODO DE LINEA MICROSTRIP .....	51
5. METODOLOGÍA DE DISEÑO. ....	53
5.1. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO. ....	53
5.2. SELECCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL DIELECTRICO. ....	55
5.3. SOFTWARE DE SIMULACIÓN. ....	56
5.4. DISEÑO DEL PARCHE .....	60
6. ANALISIS DE RESULTADOS.....	105
6.1. ANALISIS DE RESULTADOS ANTENA MICROSTRIP ANILLO CIRCULAR. ....	105
6.2. COMPARACION DE ANTENAS MICROSTRIP REALIZADAS EN LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA .....	107
7. CONCLUSIONES .....	112
8. REFERENCIAS .....	113

## TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Radiación de una antena.....	18
Figura 2. Circuito equivalente del generador y la antena.....	19
Figura 3. Voltaje incidente, reflejado y transmitido. ....	20
Figura 4. Ancho de banda.....	22
Figura 5. Patrón de radiación. ....	25
Figura 6. Localización del ángulo de máxima radiación $\theta_m$ y el ángulo de media potencia HPBW. ....	26
Figura 7. Regiones del campo. ....	27
Figura 8. Tipos de polarización.....	29
Figura 9. Tipos de antena. ....	30
Figura 10. Antena mono polo.....	31
Figura 11. Patrón de radiación de una antena mono polo. ....	32
Figura 12. Antena de lazo.....	32
Figura 13. Patrón de radiación de antenas de lazo. ....	33
Figura 14. Características físicas de la antena helicoidal. ....	34
Figura 15. Sistema de dos placas paralelas que atrapa una porción de una onda plana incidente. ....	36
Figura 16. Propagación de una onda entre dos placas paralelas. ....	37
Figura 17. Topología de parches ....	38
Figura 18. Plano E y plano H.....	39
Figura 19. Ondas espaciales. ....	40
Figura 20. Ondas de superficie.....	41
Figura 21. Ondas de fuga.....	41
Figura 22. Ondas guiadas. ....	42
Figura 23. Efectos de borde. ....	43
Figura 24. Antena anillo circular. ....	43
Figura 25. Circuito equivalente de una antena microstrip. ....	49
Figura 26. Alimentación por el método de línea microstrip ....	52
Figura 27. Acople de impedancias.....	52
Figura 28. Diagrama de flujo del diseño de la antena.....	54
Figura 29. Código propuesto. ....	57
Figura 30. Código propuesto.....	58
Figura 31. Código propuesto.....	59
Figura 32. Código propuesto.....	60
Figura 33. Antena número 1. ....	62
Figura 34. Patrón de radiación Antena número 1.....	63
Figura 35. Campo eléctrico y magnético en coordenadas cartesianas.....	63
Figura 36. Patrón de radiación simulado Antena número 1. ....	64
Figura 37. Antena número 2. ....	70
Figura 38. Patrón de radiación antena número 2. ....	71
Figura 39. Campo eléctrico y magnético en coordenadas cartesianas.....	72
Figura 40. Patrón de radiación simulado antena número 2. ....	73

Figura 41. Antena número 3. ....	79
Figura 42. Patrón de radiación antena número 3. ....	80
Figura 43. Campo eléctrico y magnético en coordenadas cartesianas. ....	81
Figura 44. Patrón de radiación antena número 3. ....	82
Figura 45. Antena número 4. ....	88
Figura 46. Patrón de radiación antena número 4. ....	89
Figura 47. Campo eléctrico y magnético en coordenadas cartesianas. ....	90
Figura 48. Patrón de radiación simulado antena número 4. ....	91
Figura 49. Antena número 5. ....	97
Figura 50. Patrón de radiación antena número 5. ....	98
Figura 51. Campo eléctrico y magnético en coordenadas cartesianas. ....	99
Figura 52. Patrón de radiación antena número 5. ....	100
Figura 53. Patrón de radiación de la antena final tipo anillo circular. ....	107
Figura 54. Patrón de radiación de la antena final tipo circular. ....	108
Figura 55. Patrón de radiación de la antena final tipo rectangular. ....	109
Figura 56. Patrón de radiación del arreglo matricial de parches rectangulares. ....	110
Figura 57. Patrón de radiación del arreglo lineal de parches rectangulares. ....	111



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Raíces $X_{nm}$ de la ecuación 4.9b.....	46
Tabla 2 Parámetros de la antena número 1.....	61
Tabla 3. Datos medidos por lab-volt y simulados en mathematica 9. ....	64
Tabla 4. Parámetros de la antena número 2.....	69
Tabla 5. Datos medidos por lab-volt y simulados en mathematica 9. ....	73
Tabla 6. Parámetros de la antena número 3.....	78
Tabla 7. Datos medidos por lab-volt y simulados en mathematica 9. ....	82
Tabla 8. Parámetros de la antena número 4.....	88
Tabla 9. Datos medidos por lab-volt y simulados en mathematica 9. ....	91
Tabla 10. Parámetros de la antena número 5.....	97
Tabla 11. Datos medidos por lab-volt y simulados en mathematica 9. ....	100
Tabla 12. Comparación datos estadísticos entre cada antena construida. ....	106

## GLOSARIO

**Longitud de onda:** Es el período espacial de una onda, es decir, la distancia que hay de punto a punto. La longitud de onda describe cuán larga es la onda.

**Patrón de radiación:** Es un diagrama polar que representa las intensidades de los campos o las densidades de potencia en varias posiciones angulares en relación con una antena.

**Impedancia de una antena:** Se puede definir la impedancia de entrada mediante la relación tensión-corriente en ese punto de entrada donde el transmisor produce corrientes y campos. Esta impedancia poseerá una parte real  $\text{Re}(w)$  y una parte imaginaria  $\text{Ri}(w)$ , dependientes de la frecuencia. La parte real se denomina resistencia de antena y la parte imaginaria, reactancia de antena.

**Microstrip:** Es un tipo de línea de transmisión eléctrica que pueden ser fabricados utilizando placa de circuito impreso, y se utiliza para transmitir señales de microondas.

**Permeabilidad:** Enfocado en la física es también denominado permeabilidad magnética, siendo esta la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través de sí los campos magnéticos, la cual está dada por la relación entre la intensidad de campo magnético existente y la inducción magnética que aparece en el interior de dicho material.

**Dieléctrico:** Material que es mal conductor, por lo que en algunos casos puede ser utilizado como aislante eléctrico y además si este es sometido a un campo eléctrico externo, puede establecer un campo eléctrico interno.

**Permitividad:** También llamada constante dieléctrica absoluta. Es una constante física que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio. También llamado Permitividad eléctrica ( $\epsilon$ ). Está muy relacionada con la susceptibilidad eléctrica.

**LVDAM-ANT:** software simulador del patrón de radiación de antenas.

**Impedancia de una antena:** se define como la relación entre la tensión y la corriente en sus terminales de entrada. Dicha impedancia es en general compleja. La parte real se denomina resistencia de antena y la parte imaginaria, reactancia de antena.

## **RESUMEN GENERAL**

**TÍTULO:** DISEÑO Y ANALISIS DE UN PARCHE TIPO ANILLO CIRCULAR PARA UNA ANTENA MICROSTRIP.

**AUTOR:** JOSE OSWALDO MOLINA GOMEZ.

JOSE ALBERTO GOMEZ TIBADUIZA.

**FACULTAD:** INGENIERÍA ELECTRÓNICA.

**DIRECTOR:** Esp. FABIO ALONSO GUZMAN SERNA.

## **RESUMEN**

El proyecto de grado desarrolla los conceptos teóricos necesarios para el diseño, construcción y análisis del patrón de radiación de un parche anillo circular para una antena Microstrip. Dadas las características de la antena y basándose en una investigación previa de las teorías y en los desarrollos para esta topología, el método que se utiliza en el diseño es el de CAVIDADES. Los cálculos de las ecuaciones propuestas por dicha metodología y su respectiva simulación se realizó con ayuda del software Mathematica 9. El prototipo de antena se validó a través de pruebas que se realizaron con el módulo LVDAM-ANT desarrollado por LAB-VOLT y adquirido por la universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga. Finalmente se realizó un contraste de resultados teóricos y experimentales de este proyecto y de otros previamente realizados en la universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga.

**PALABRAS CLAVES:** Microstrip, Mathematica 9, Lab-Volt.

## **GENERAL ABSTRACT**

**TITLE:** DESIGN AND ANALYSIS OF A CIRCULAR RING PATCH FOR ANTENNA MICROSTRIP.

**AUTHOR:** JOSE OSWALDO MOLINA GOMEZ.

JOSE ALBERTO GOMEZ TIBADUIZA.

**FACULTY:** INGENIERÍA ELECTRÓNICA.

**DIRECTOR:** Esp. FABIO ALONSO GUZMAN SERNA.

## **ABSTRACT**

The graduation project develops theoretical necessary concepts for the design, construction and analysis of the pattern radiation of a circular ring patch for a microstrip antenna. Given the characteristics of the antenna and based on a previous research of theories and developments for this topology, the method used in the design is the VOID. The calculations of the proposed equations by this methodology and the respective simulation is using the software realization Mathematica 9. The prototype antenna is validated through tests conducted with LVDAM-ANT module developed by LAB-VOLT and acquired by the University Pontificia Bolivariana Bucaramanga. Finally we performed contrast theoretical and experimental results of this project and other previously conducted at the University Pontificia Bolivariana Bucaramanga.

**KEY WORDS:** Microstrip, Mathematica 9 Lab-Volt.

## INTRODUCCIÓN

La IEEE define como antena a “aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas [3]; se puede asegurar que existen varios tipos de antenas, es por esto que dependiendo de la necesidad que se tenga se puede destinar uno u otro tipo.

Este proyecto se concentrará en las antenas con tecnología MICROSTRIP, exactamente en la construcción de un anillo circular. En el documento se desarrolla una breve introducción de los parámetros y características más importantes de la antena así como el diseño y fabricación de la antena Anillo circular con tecnología Microstrip, además del análisis de sus parámetros característicos, tales como, el diagrama de radiación, ancho de banda, directividad, ganancia, eficiencia, impedancia de entrada, anchura de haz, resistencia de radiación, entre otras.

Basados en la literatura, avances y desarrollos, se opta por modelar a partir del método de cavidades, se resuelve un vacío de diseño en cuanto a que no se encontró en la literatura una ecuación para calcular la impedancia de entrada del parche resonante tipo anillo, razón por la cual se optimiza el cálculo de dicha impedancia a partir de una analogía con el parche rectangular. Con los resultados se construyeron cinco prototipos que se probaron con ayuda del módulo LVDAM-ANT desarrollado por LAB-VOLT. Cada uno de los prototipos construidos se fueron depurando a través de simulaciones del patrón de radiación simulado en la plataforma mathematica 9.

En el capítulo dos se muestra la información básica de las antenas, la reseña histórica, algunos parámetros y principios de operación y tipos de antenas, además la teoría electromagnética necesaria para la construcción de la antena microstrip. En el capítulo tres y cuatro se resumen las ecuaciones de diseño utilizadas para la antena microstrip anillo circular y para simular el patrón de radiación. El capítulo cinco desglosa toda la metodología y especificaciones necesarias de diseño, dejando en los capítulos seis y siete el análisis matemático de los resultados obtenidos y las conclusiones.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. Objetivo General**

- Diseñar, construir y analizar el patrón de radiación de una antena Microstrip Anillo circular.

### **1.2. Objetivos Específicos**

- Seleccionar un método o modelo matemático que permita el diseño, desarrollo y posterior construcción de la antena.
- Construcción física de la antena teniendo en cuenta todos los aspectos obtenidos en el diseño de la misma.
- Realizar las pruebas necesarias para comprobar las características de diseño y los resultados obtenidos en la antena construida.
- Analizar los resultados obtenidos experimentalmente, comparando estos parámetros con los hallados en la etapa del diseño.
- Comparar el patrón de radiación de la antena Microstrip Anillo Circular con otras antenas Microstrip desarrolladas en la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

## **2. MARCO TEORICO**

### **2.1. INTRODUCCION**

Las antenas son estructuras metálicas diseñadas para radiar y recibir energía electromagnética. Una antena es una estructura que representa la transición entre un dispositivo conductor (guía de onda o línea de transmisión) y el espacio libre. La definición oficial del IEEE de una antena es: “Componente de un sistema transmisor o receptor que es diseñado para radiar o recibir ondas electromagnéticas” [12].

Las antenas microstrip conocidas también como antenas tipo parche, son un revolucionario descubrimiento de las comunicaciones y por tanto, un componente fundamental de todos los sistemas de radiocomunicaciones. El estándar IEEE (IEEEStd 145-1983) define la antena como “un medio para irradiar o recibir ondas de radio”. Los primeros diseños forman parte de los años 50, y se empiezan a utilizar en sistemas a partir de los años 70. Las características de las antenas dependen de la relación entre sus dimensiones y la longitud de onda de la señal de radiofrecuencia transmitida o recibida, y su estructura consiste en un parche metálico (dimensiones comparables a la longitud de onda  $\lambda$ ), sobre un sustrato dieléctrico que no posee pérdidas. El grosor oscila entre  $0.003\lambda$  y  $0.05\lambda$  dependiendo del fin al cual esté destinada. La constante dieléctrica ( $\epsilon_r$ ) puede tomar valores típicos entre 2 y 12 y en la parte inferior de la estructura se tiene un plano conductor perfecto.

### **2.2. RESEÑA HISTORICA**

A mediados del siglo XX más exactamente en año de 1953 se descubrió la capacidad que tenían las estructuras de microcinta para radiar ondas electromagnéticas, pero no fue sino hasta 20 años después donde se diseñaron las primeras aplicaciones prácticas para este fenómeno [4].

Las antenas Microstrip han diversificado sus aplicaciones en campos tales como la aeronáutica y el militar solo por mencionar algunos. Existe un tipo de antena microcinta popular denominada antena de parche, su nombre se le atribuye debido a que el conductor metálico se encuentra suspendido sobre un plano de tierra y en la parte central se encuentra un dieléctrico aislando eléctricamente un aplaca de la otra.

Además de las considerables ventajas operativas este tipo de antenas son de baja eficiencia, poca ganancia, radiaciones espurias, poca capacidad de manejo de potencia y excitación de ondas superficiales entre otros. A su favor las antenas Microstrip tienen un alto factor de calidad  $Q$  (que algunas veces excede a 100) y representa a las pérdidas asociadas a la antena. Cuanto más grande sea  $Q$  se tiene menor eficiencia y un ancho de banda más angosto [4]. El factor de calidad puede reducirse incrementando el espesor del sustrato dieléctrico, pero conforme va aumentando una parte de la potencia total entregada por la fuente se convierte en ondas de superficie que son consideradas como pérdidas indeseadas de potencia dispersas en los cambios de dirección de la microcinta, provocando a su vez degradación de las características de la antena. Es posible minimizar dicho efecto de ondas de superficie utilizando una banda de cavidad fónica [5].

Para algunas aplicaciones como son los sistemas de seguridad se requieren un ancho de banda angosto, es por esto y gracias al diseño en donde se aprovechan dichas características antes consideradas una desventaja. En la literatura se pueden encontrar diversas técnicas de diseño para mejorar algunas de sus desventajas por ejemplo se puede extender la eficiencia hasta un 90% incrementando el espesor del sustrato (excluyendo las ondas de superficie), y así obtener una banda de un 35% [4]. Otra manera de incrementar el ancho de banda y la ganancia es reduciendo la constante dieléctrica efectiva de la misma, utilizando aire con un determinado espesor entre el sustrato dieléctrico y el plano de tierra [6] [7].

Lubin Yan (1991) obtuvo un ancho de banda de 20 a 30% en un arreglo de parches de microcinta apilados (stacked) por fases [8]. Katehi Pisti (1987) demuestra un incremento del ancho de banda incorporando dipolos de microcinta o elementos parásitos acoplados electromagnéticamente en terminales abiertas de líneas de microcinta [9]. Liu Zhang-Fa (1999) propone otra técnica para incrementar el ancho de banda hasta un 25.7%, en la cual utiliza estructuras planares multicapas. Lee Choon Sae (1993) et al desarrollaron antenas de microcinta para operar a dos frecuencias distintas [11]. Kai-Fong Lee (1984) propone una fórmula para obtener las frecuencias de resonancia de una antena de parche circular con una capa de aire entre el sustrato y el plano de tierra utilizando el modelo de cavidades. En el trabajo de tesis realizado por Flores-Cuadras J. [1] se planteó una metodología para el desarrollo de una antena planar activa diseñada para operar en la banda superior de la U-NII a 5.8GHz, cumpliendo con los requerimientos de diseño del estándar de 802.11a. Estas antenas mencionadas fueron desarrolladas para distintas aplicaciones debido a que manejan diferentes bandas de frecuencia, diferentes características de operación y emplean diferentes metodologías de diseño y análisis.

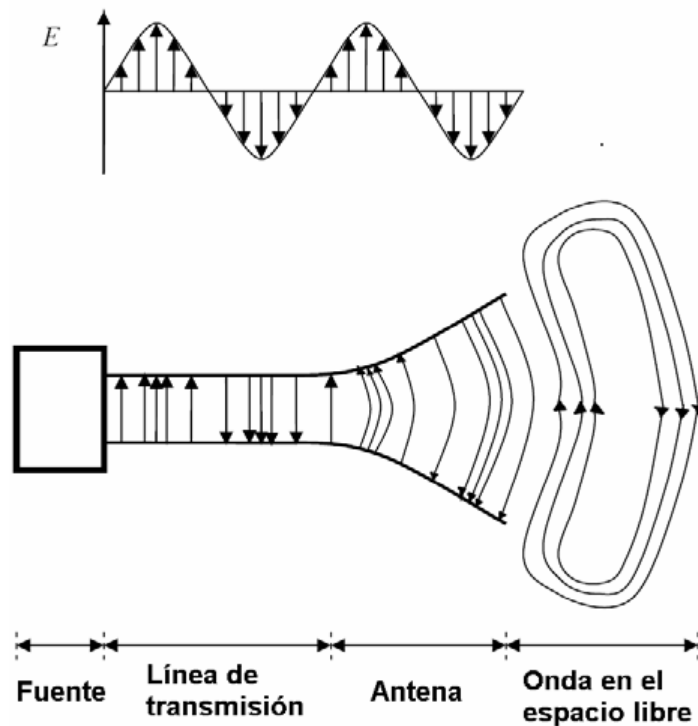


### **2.3. PRINCIPIO DE OPERACIÓN DELAS ANTENAS**

Una antena es una estructura que representa la transición entre un dispositivo conductor y el espacio libre. Para conocer como una antena puede radiar, se debe considerar el principio de radiación: Un cable conductor radia principalmente debido a la variación de la corriente con el tiempo o por una aceleración o desaceleración de las carga eléctricas. Si no hay movimiento de las cargas en el cable, no ocurrirá la radiación, debido a que no hay un flujo de corriente. Cuando las cargas se están moviendo con velocidad uniforme a lo largo de un cable recto, no podría haber radiación, pero si es un cable curvado o doblado si podría radiar [4].

La radiación de una antena puede explicarse con la ayuda de la figura 1, la cual muestra una fuente de voltaje conectada a una línea de transmisión compuesta de dos cables. Cuando el voltaje sinusoidal se aplica a lo largo de la línea de transmisión, se crea un campo eléctrico de naturaleza sinusoidal debido a la creación de líneas de fuerza las cuales son tangenciales al campo eléctrico. La magnitud del campo eléctrico depende de lo agrupadas que estén las líneas de fuerza eléctrica. Los electrones libres en los conductores se desplazan forzosamente por las líneas de fuerza eléctrica y el movimiento de estas cargas provoca un flujo de corriente que a su vez induce la creación del campo magnético.

Figura 1. Radiación de una antena.



Fuente i. Constantine A. Balanis., *Antenna Theory, Analysis And Design.*, Tercera Edition, John Wiley y Sons., 2005

Debido a la variación de los campos eléctricos y magnéticos con el tiempo, se forman las ondas electromagnéticas, las cuales viajan entre los conductores. Cuando estas ondas se van aproximando al espacio abierto, se generan ondas espaciales en las terminales abiertas de las líneas eléctricas. Dentro de la línea de transmisión y la antena, las ondas electromagnéticas existen debido a las cargas, pero cuando entran al espacio libre, se forman lazos cerrados y se radian [4].

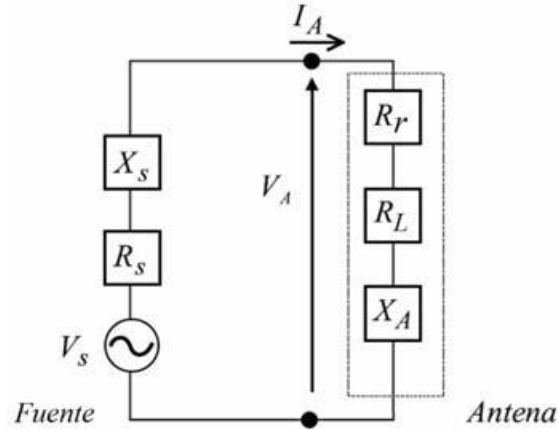
## 2.4. PARAMETROS DE LAS ANTENAS

Los parámetros de las antenas son los elementos que permiten hacer una comparación entre las propiedades de radiación, para así tener una mejor visión de las ventajas de cada antena. Por otro lado, para un diseñador de sistemas de comunicación son los parámetros los que le permiten elegir la mejor antena, según sus necesidades de comunicación. Los parámetros más relevantes que describen a las antenas son la impedancia de la antena, las pérdidas por retorno, el ancho de banda, la ganancia, el patrón de radiación, el ancho del haz, la directividad, las regiones del campo, tipo de polarización y eficiencia. Los cuales se definen a continuación.

### 2.4.1. IMPEDANCIA DE LA ANTENA

La impedancia de la antena ( $Z_{Ant}$ ) se define como la impedancia presentada por la antena en sus terminales, representada como una razón de voltaje a corriente, la cual depende de las propiedades de los campos eléctricos y magnéticos [4]. En la figura 2 se muestra el circuito equivalente del generador de señales y el de una antena.

Figura 2. Circuito equivalente del generador y la antena.



Fuente. Constantine A. Balanis., *Antenna Theory, Analysis And Design.*, Tercera Edition, John Wiley y Sons., 2005

La impedancia de la antena se define por las ecuaciones 2.1 y 2.3. La parte imaginaria  $X_A$  representa la energía almacenada en el campo cercano de la antena, mientras que la parte resistiva  $R_A$  consiste de dos componentes, la resistencia de radiación  $R_r$  y las pérdidas resistivas  $R_L$ .

$$Z_{ant} = R_A + jX_A \quad (2.1)$$

$$R_A = R_r + R_L \quad (2.2)$$

$$Z_{ant} = Z_0 * (1 + S_{11}) / (1 - S_{11}) \quad (2.3)$$

Dónde:

$R_A$  = Resistencia de la antena ( $\Omega$ ).

$X_A$  = Reactancia de la antena ( $\Omega$ ).

$R_r$  = Resistencia de radiación ( $\Omega$ ).

$R_l$  = Pérdidas resistivas debido al conductor dieléctrico ( $\Omega$ ).

La potencia asociada con la resistencia de radiación, es la potencia radiada por la antena, mientras que las pérdidas resistivas disipan parte de la potencia total en forma de calor. Para que la antena se comporte como un elemento resonante a una frecuencia, la reactancia debe cancelarse ( $XC = XL$ ) en la ecuación 2.4. Por lo tanto, la impedancia será mínima e igual a la resistencia óhmica (ecuación 2.5). Esto también establece que el circuito se encuentra en fase [4].

$$Z_{ant} = \sqrt{R_A^2 + (XC^2 - XL^2)} \quad (2.4)$$

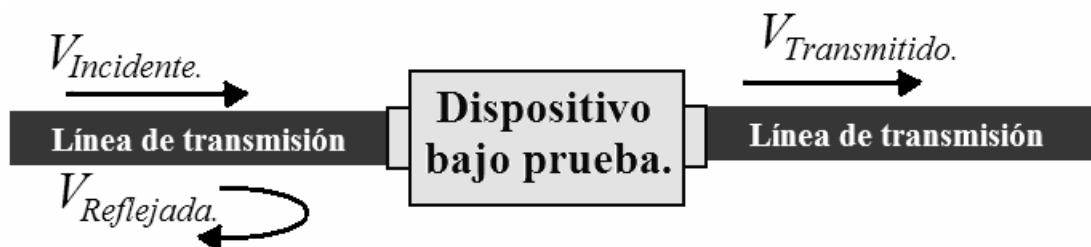
Y siendo  $XC = XL$ , entonces la impedancia será totalmente resistiva:

$$Z_{ant} = R_A \quad (2.5)$$

#### 2.4.2. COEFICIENTE DE REFLEXION, RELACION DE ONDA ESTACIONARIA Y PERDIDAS POR REGRESO.

El coeficiente de reflexión  $\Gamma$  describe la magnitud y el cambio de fase de una señal reflejada debido al desacoplamiento de la impedancia de la carga y la impedancia característica, es decir, indica una fracción reflejada de una señal incidente (figura 3).

Figura 3. Voltaje incidente, reflejado y transmitido.



Fuente. Buenrostro Rocha Sergio, Metodología para el diseño y construcción de una antena microcinta en la banda de wimax a 3,5 GHz, Tijuana-Mexico, 2007, Trabajo de grado (Maestro en ciencias), Instituto Politécnico Nacional.

El  $\Gamma$  está definido dentro del rango especificado en la ecuación 2.6 y se calcula mediante la ecuación 2.7.

$$-1 \leq \Gamma \leq 1 \quad (2.6)$$

$$\Gamma = \frac{V_{ref}}{V_{inc}} = \frac{V_{SWR}-1}{V_{SWR}+1} \quad (2.7)$$

Dónde:

$V_{ref}$  = Voltaje reflejado.

$V_{inc}$  = Voltaje incidente.

La relación de onda estacionaria de voltaje (Voltaje Standing Wave Ratio “VSWR”), es la relación de un nivel de voltaje máximo a un nivel mínimo de las ondas incidentes y reflejadas presentes en una línea de transmisión, y se define por la ecuación 2.8

$$V_{SWR} = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{|1+\Gamma|}{|1-\Gamma|} \quad (2.8)$$

$$V_{max} = V_{inc} + V_{ref} \quad (2.9)$$

$$V_{min} = V_{inc} - V_{ref} \quad (2.10)$$

Las pérdidas por regreso RL o S11 indican el nivel de la señal reflejada con respecto a la señal incidente en dB, representado también como la magnitud del  $\Gamma$  expresado en dB, y se calcula con la ecuación 2.11. Si RL es mayor a cero, significa que se está reflejando más de lo que está incidiendo.

$$R_l = 20 * \text{Log}(|\Gamma|) \quad (2.11)$$

### 2.4.3. ANCHO DE BANDA

El ancho de banda de una antena (BW), se define como el rango de frecuencias alrededor de la frecuencia central, donde los valores de los parámetros como la impedancia de entrada, patrón de radiación, ancho del haz o ganancia son cercanos a los valores obtenidos en la frecuencia central. El ancho de banda de una antena se puede dividir en dos tipos: el de ganancia y el de impedancia. El ancho de banda de ganancia es el rango de frecuencias donde la ganancia es 3dB menor respecto a la ganancia máxima en ese rango. El Ancho de banda de impedancia se mide en porcentaje de la frecuencia central, para un rango de frecuencias donde el  $VSWR < 2$  ó con pérdidas por regreso menores a -9.5dB. [4] y puede calcularse mediante la ecuación 2.12.

$$\%BW = \left( \frac{F_{VSWR}}{F_c} \right) * 100 \quad (2.12)$$

Dónde:

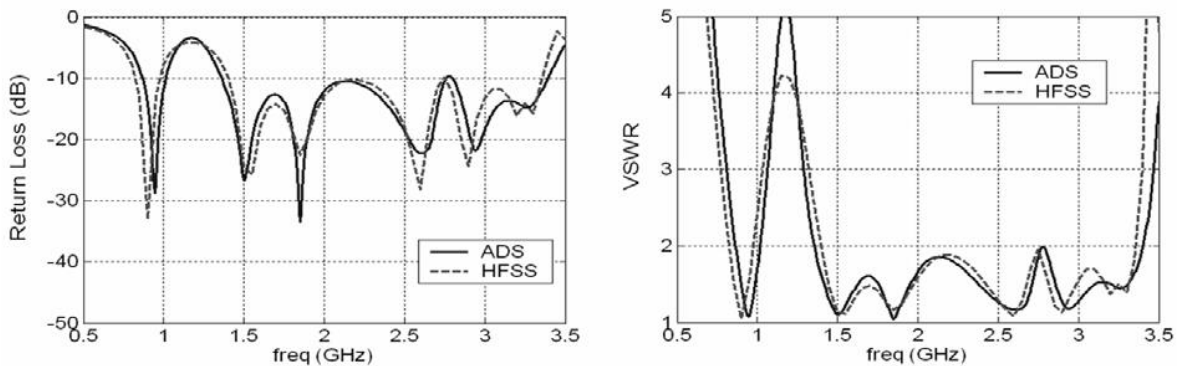
$\%BW$  = Ancho de banda (%).

$F_{VSWR}$  = Rango de frecuencias donde el  $VSWR < 2$  (Hz).

$F_c$  = Frecuencia central (Hz).

En la figura 4 se muestra un ejemplo del ancho de banda de impedancia de una antena que opera desde 1.35GHz hasta 3.3GHz.

Figura 4. Ancho de banda.



Fuente. Buenrostro Rocha Sergio, Metodología para el diseño y construcción de una antena microcinta en la banda de wimax a 3,5 GHz, Tijuana-Mexico, 2007, Trabajo de grado (Maestro en ciencias), Instituto Politécnico Nacional.

#### 2.4.4. DIRECTIVIDAD

La directividad de una antena (D), se define como la razón de la intensidad de radiación en una dirección dada desde la antena, a una intensidad radiada promedio en todas las direcciones, en las cuales el promedio de la intensidad radiada es igual a la potencia de entrada en la antena dividido por  $4\pi$ , esto se representa por la ecuación 2.13. En otras palabras se puede decir que la directividad se puede definir donde la potencia se radia con mayor intensidad en una dirección. Cuando no se especifica la dirección, entonces se refiere a la directividad máxima la cual se resume por la ecuación 2.14 [4].

$$Dir = \frac{4\pi U}{P_{RAD}} \quad (2.13)$$

$$D_0 = \frac{\pi^2}{\theta_H \theta_E} \quad (2.14)$$

Dónde:

Dir = Directividad (adimensional)

D<sub>0</sub> = Directividad máxima (adimensional)

U = Intensidad radiada (W)

P<sub>rad</sub> = Potencia radiada (W)

Θ<sub>H</sub> = Barrido de ángulo a mitad de la potencia en el plano H (rad)

Θ<sub>E</sub> = Barrido de ángulo a mitad de la potencia en el plano E (rad)

#### 2.4.5. GANANCIA

La ganancia de la antena (G) es un parámetro que está relacionado de manera muy cercana a la directividad, y representa la razón de la intensidad de radiación en una dirección, a la intensidad de radiación de una antena que radia de manera isotrópica. La intensidad de radiación correspondiente a la potencia radiada isotrópica es igual a la potencia de entrada de la antena dividida por  $4\pi$  como se ilustra por la ecuación 2.15. Dado que algunas antenas radian mayor potencia en una dirección que en otras, por consiguiente la ganancia es la cantidad de

potencia radiada en una dirección a expensas de una reducción de potencia radiada en otras direcciones. La ganancia siempre está relacionada con el lóbulo principal y se especifica en la dirección de máxima radiación, a menos que se indique lo contrario [4]. En una antena, la potencia de entrada se transforma en potencia radiada, donde una pequeña parte, se absorbe debido a las pérdidas del conductor y del dieléctrico utilizado. Si la antena es 100% eficiente, entonces la potencia de entrada será igual a la potencia radiada por la antena. La ganancia es dimensional pero comúnmente puede expresarse en decibels por la ecuación 2.16 y se relaciona con la eficiencia “ $\eta$ ” de la antena mediante la ecuación 2.17. Donde:

$$G = 4\pi U / P_{ent} \quad (2.15)$$

$$G[\text{dB}] = 10 \cdot \text{Log}(G) \quad (2.16)$$

$$G = \eta * D_{ir} \quad (2.17)$$

$$P_{rad} = \eta * P_{ent} \quad (2.18)$$

Donde

$G$  = Ganancia de la antena (adimensional y dB).

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

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

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

$D_{ir}$  = Directividad de la antena (adimensional o en dB).

$\eta$  = Eficiencia de la antena.

#### 2.4.6. PATRON DE RADIACION

El patrón de radiación, se define como una función matemática que representa gráficamente las propiedades de radiación de la antena en una función de coordenadas que representan la región de los campos lejanos. Es el área en el cual la señal transmitida por una antena puede ser recibida. El patrón de radiación



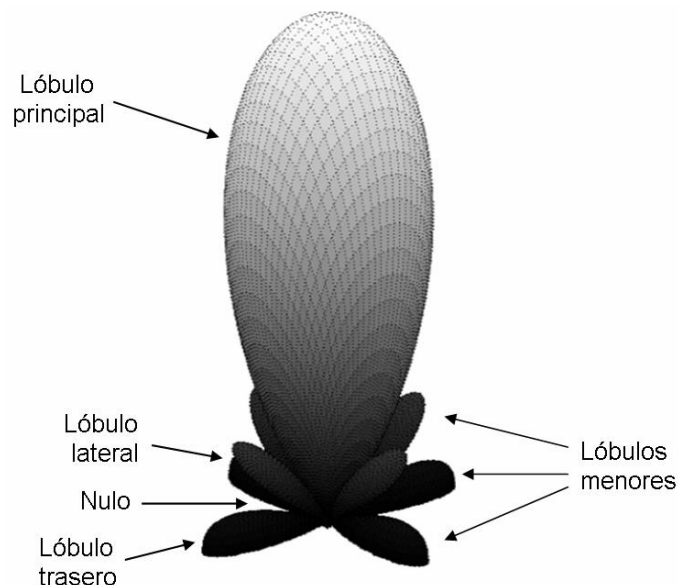
puede graficarse en dos y en tres dimensiones en función del ángulo de orientación con respecto a la antena. Para fines prácticos el patrón de radiación se mide en dos dimensiones. En base a su diagrama de radiación, una antena puede considerarse:

**a. Isotrópica.** Un radiador isotrópico se define como una antena hipotética “sin pérdidas” capaz de radiar con la misma intensidad en todas las direcciones.

**b. Direccional.** Un radiador direccional transmite o recibe ondas electromagnéticas con mayor eficiencia en ciertas regiones que otras, concentrando la energía en una dirección.

**c. Omnidireccional.** Un radiador omnidireccional es aquél que tiene un diagrama de radiación no direccional en cierto plano y uno direccional en cualquier plano ortogonal. Algunas partes del patrón de radiación se denominan lóbulos, los cuales son porciones del patrón de radiación limitados por regiones con una intensidad de radiación relativamente débil. Los lóbulos de radiación se clasifican en lóbulo principal y lóbulos menores o laterales (side lobe level “SLL”). Las distintas categorías de lóbulos se muestran en la figura 5.

*Figura 5. Patrón de radiación.*

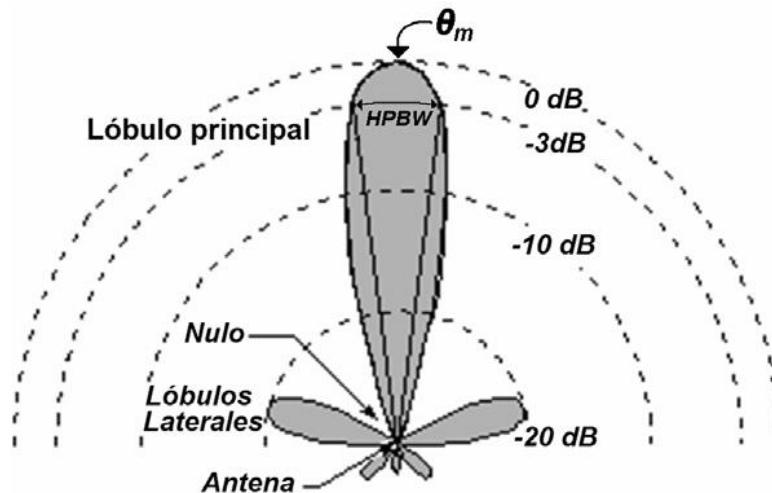


*Fuente. Buenrostro Rocha Sergio, Metodología para el diseño y construcción de una antena microcinta en la banda de wimax a 3,5 GHz, Tijuana-Mexico, 2007, Trabajo de grado (Maestro en ciencias), Instituto Politécnico Nacional.*

#### **2.4.7. ANGULO DE MAXIMA RADIACION Y ANGULO DE MEDIA POTENCIA**

El ángulo de máxima radiación  $\theta_m$ , es el punto angular en donde la densidad del flujo de potencia radiada es máxima. El ancho del haz o ángulo de potencia mitad (Half power beamwidth “HPBW”), se expresa usualmente en grados y es el ángulo donde la potencia cae a mitad (-3 dB) por debajo del ángulo de máxima radiación, como se puede apreciar en la figura 6. Normalmente se mide en el plano horizontal (Magnético), aunque también puede medirse en el plano vertical (Eléctrico) [14].

Figura 6. Localización del ángulo de máxima radiación  $\theta_m$  y el ángulo de media potencia HPBW.

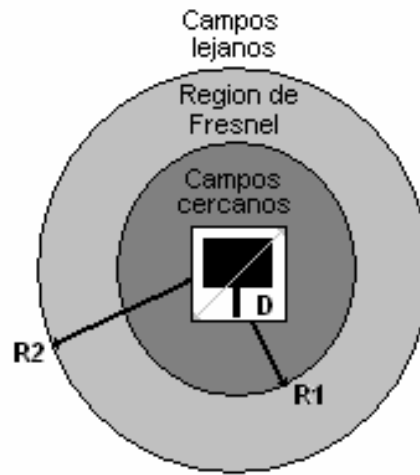


Fuente. Buenrostro Rocha Sergio, Metodología para el diseño y construcción de una antena microcinta en la banda de wimax a 3,5 GHz, Tijuana-Mexico, 2007, Trabajo de grado (Maestro en ciencias), Instituto Politécnico Nacional.

#### 2.4.8. REGIONES DE CAMPO

El espacio que rodea a la antena usualmente se divide en tres regiones, que son la región de los campos cercanos, la región de Fresnel, y la región de los campos lejanos. La primera región es donde los campos reactivos son los que predominan. En la segunda región los campos radiadores predominan. La tercera región es cuando la distribución del campo angular es independiente de la distancia desde la antena, como se puede observar en la figura 7 [4]. La región de los campos cercanos y la de Fresnel se pueden calcular con las ecuaciones 2.19 y 2.20.

Figura 7. Regiones del campo.



Fuente. Buenrostro Rocha Sergio, Metodología para el diseño y construcción de una antena microcinta en la banda de wimax a 3,5 GHz, Tijuana-Mexico, 2007, Trabajo de grado (Maestro en ciencias), Instituto Politécnico Nacional.

$$R1 = 0.62\sqrt{D^2/\lambda} \quad (2.19)$$

$$R2 = 2D^2/\lambda \quad (2.20)$$

Dónde:

R1 = Región de los campos cercano.

R2 = Región de Fresnel (m).

D = Dimensión máxima de la antena (m).

$\lambda$  = Longitud de onda en el espacio (m).

#### 2.4.9. EFICIENCIA

La eficiencia de la antena ( $\eta$ ) es un parámetro que indica la capacidad que tiene la antena para radiar, la cual se define como la razón entre la potencia radiada y la potencia de entrada. También se puede relacionar con la conductancia de

radiación Grad, la conductancia de entrada  $G_{in}$  y la resistencia de radiación  $R_{rad}$  [15], y puede calcularse mediante la ecuación 2.21.

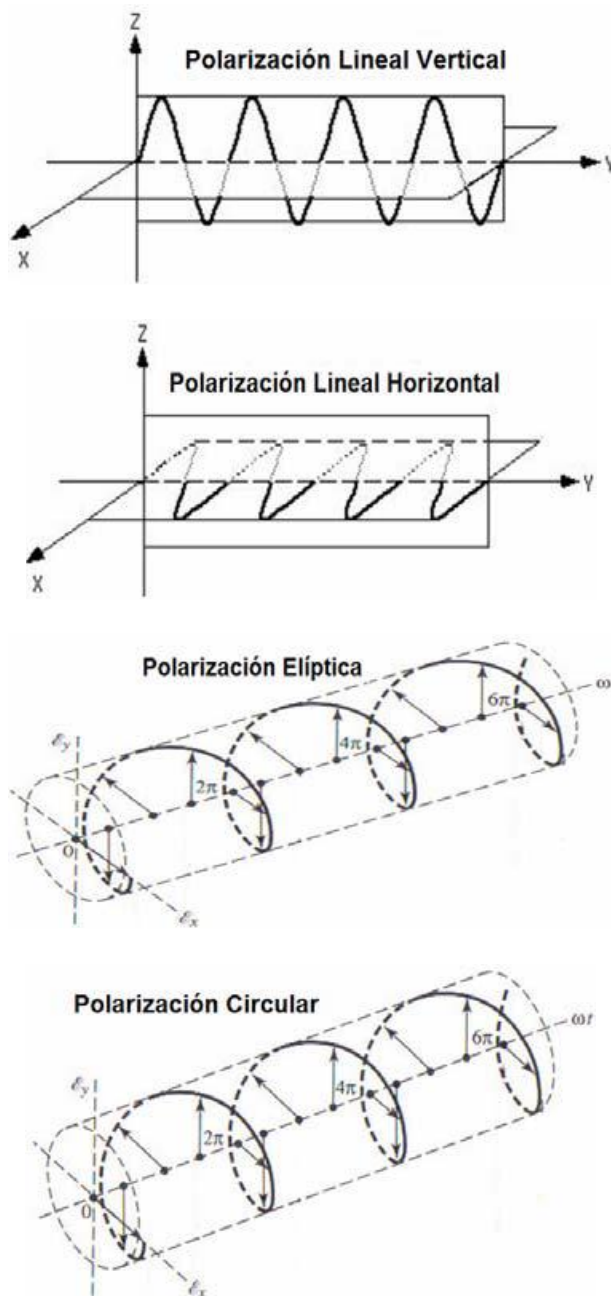
$$\eta = \left( \frac{G_{rad}}{G_{in}} \right) = \frac{1}{G_{in} * P_{rad}} \quad (2.21)$$

En el caso de las líneas de microcinta, los substratos deben de tener una permitividad relativa alta, para que el campo electromagnético se propague dentro de él sin presentar fugas del campo (radiación). Por otra parte los substratos de baja permitividad se utilizan para el desarrollo de antenas, puesto que permiten que el campo electromagnético se radie. Por lo tanto, cuando la permitividad del substrato se aproxima a la permitividad relativa del vacío, éste radiará con mayor facilidad, provocando un incremento de la eficiencia de la antena [15].

#### **2.4.10. POLARIZACION**

La polarización de una onda radiada, se define como el vector del campo eléctrico que se mueve en función del tiempo sobre un punto fijo en el espacio. La punta del vector describe la figura geométrica que forma la polarización. La polarización lineal vertical se obtiene cuando el campo eléctrico, se mueve a lo largo de la tierra en el plano vertical, y la polarización lineal horizontal es aquella que oscila en paralelamente con la tierra [4], como se muestra en la figura 8. Cuando dos componentes polarizadas linealmente no están en fase, su vector suma gira sobre la dirección de propagación, mientras que su amplitud puede ser periódica. En este caso las puntas de los vectores del campo eléctrico forman una elipse cuya forma y orientación se controlan por la amplitud relativa y fase de las dos componentes (figura 8). Cuando dos componentes polarizadas linealmente de un campo polarizado elípticamente tienen la misma amplitud y están en cuadratura (desfasados 90° grados), la elipse se convierte en circular (figura 8). Por lo que en la polarización elíptica y circular se tienen dos tipos de rotaciones que son con el sentido del reloj y contra el sentido del reloj.

Figura 8. Tipos de polarización.



Fuente. Buenrostro Rocha Sergio, Metodología para el diseño y construcción de una antena microcinta en la banda de wimax a 3,5 GHz, Tijuana-Mexico, 2007, Trabajo de grado (Maestro en ciencias), Instituto Politécnico Nacional.

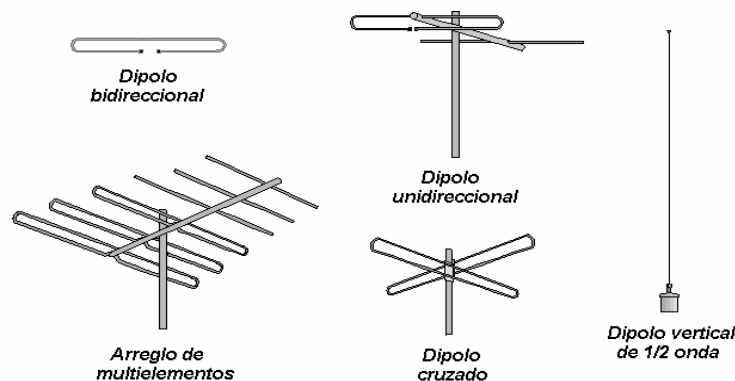
## 2.4.11. POLARIZACION CRUZADA Y CO-POLARIZACION

La polarización cruzada o cross-polarización de una antena, está definida como la polarización ortogonal relacionada con la polarización de una antena de referencia. En el campo co-polarizado de una fuente se tiene que la componente del campo es paralela al campo de la fuente de referencia, por lo que en la polarización cruzada, la antena receptora recibe menor potencia que en la co-polarización. Una antena ideal, no tiene componente cross-polar y sería igual al infinito. Para las antenas de microcinta se encuentran en un rango de aproximadamente 20 a 30dB [16].

## 2.5. TIPOS DE ANTENAS

En esta sección se describirán algunos tipos de antenas existentes como los monopolos, dipolos, antena de lazo, arreglos de elementos, antenas helicoidales y de corneta. Se indican algunas ventajas y desventajas de los parámetros de estas antenas y se mencionan algunas aplicaciones. Cada tipo de antena posee diferentes formas, tamaños, materiales de fabricación y metodologías de diseño, para satisfacer diferentes tipos de aplicaciones inalámbricas. Algunas antenas utilizadas comúnmente se describen a continuación.

*Figura 9. Tipos de antena.*



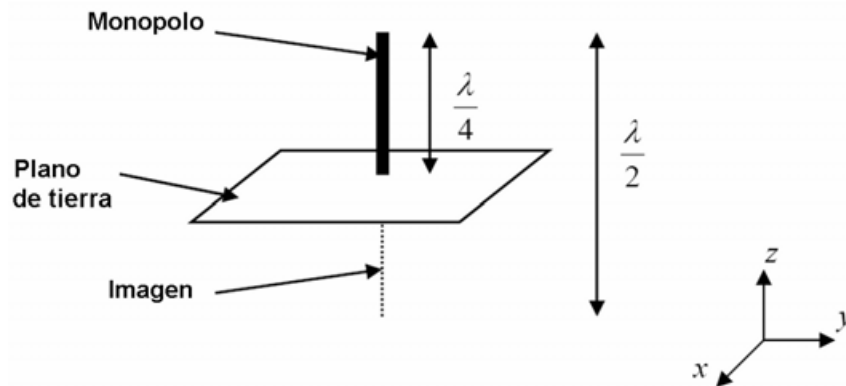
*Fuente. Buenrostro Rocha Sergio, Metodología para el diseño y construcción de una antena microcinta en la banda de wimax a 3,5 GHz, Tijuana-Mexico, 2007, Trabajo de grado (Maestro en ciencias), Instituto Politécnico Nacional.*

### 2.5.1. ANTENA MONOPLO

Una antena aterrizada de un cuarto de onda  $1/4\lambda$  puede resonar a la misma frecuencia que una antena de media onda  $1/2\lambda$  no aterrizada y mantener las mismas respuestas de los parámetros. Esto es porque la tierra tiene alta

conductividad y actúa como la imagen de un espejo eléctrico, por lo que se complementa la otra mitad de la antena de  $1/4\lambda$  como se muestra en la figura 10. La terminal aterrizada de la antena  $1/4\lambda$  tiene una impedancia de entrada baja y maneja poco voltaje pero alta corriente, mientras que la terminal no aterrizada tiene una alta impedancia, lo cual provoca un alto voltaje y baja corriente. La radiación ocurre en el plano normal a la tierra [13].

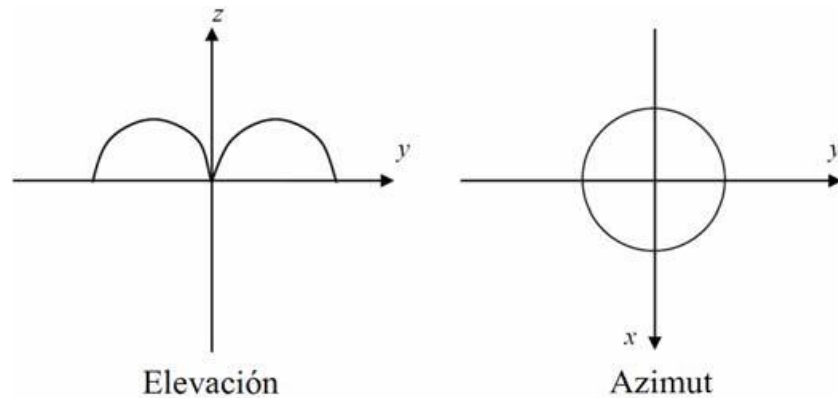
Figura 10. Antena mono polo.



Fuente. Buenrostro Rocha Sergio, Metodología para el diseño y construcción de una antena microcinta en la banda de wimax a 3,5 GHz, Tijuana-Mexico, 2007, Trabajo de grado (Maestro en ciencias), Instituto Politécnico Nacional.

Para este tipo de antena, la directividad se duplica y la resistencia de radiación se reduce a la mitad, en comparación con la del dipolo. De esta manera, un dipolo de media onda puede aproximarse por un monopolo de  $1/4\lambda$ . El monopolo es muy utilizado en antenas móviles, donde el plano de tierra, puede ser el chasis de un automóvil o el de algún dispositivo de comunicaciones portátil. La ganancia típica del monopolo de  $1/4\lambda$  puede variar de 2 a 6dB y tiene un ancho de banda de aproximadamente 10%. Su resistencia de radiación es de  $36.5\Omega$  y su directividad puede estar entre 3.28 y 5.16dB [12]. El patrón de radiación para el monopolo es omni-direccional, y utiliza la polarización lineal vertical ya que es menos sensible a la interferencia por multi-trayectorias. En la figura 11 se muestra el patrón de radiación de una antena monopolo.

Figura 11. Patrón de radiación de una antena mono polo.



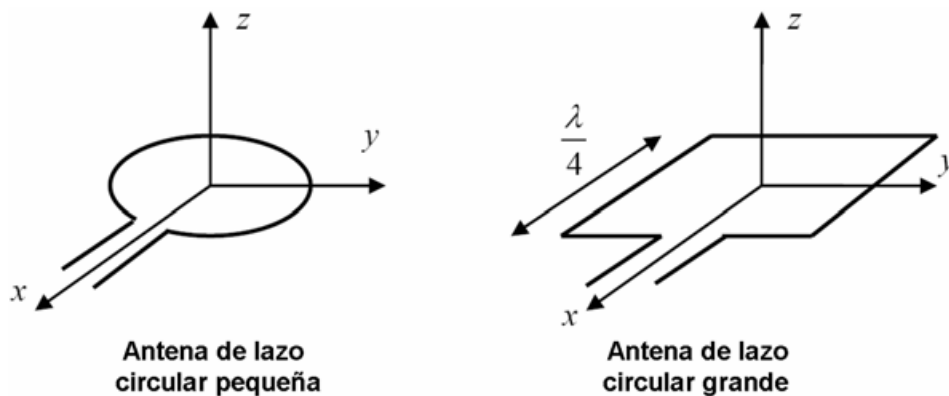
Fuente. Buenrostro Rocha Sergio, Metodología para el diseño y construcción de una antena microcinta en la banda de wimax a 3,5 GHz, Tijuana-Mexico, 2007, Trabajo de grado (Maestro en ciencias), Instituto Politécnico Nacional.

## 2.5.2. ANTENA DE LAZO

La antena de lazo es un conductor curvado en forma de círculo o de rectángulo con una abertura en el conductor, que conforman las terminales, como se muestra en la figura 12.

Existen dos tipos de antenas de lazos: antena de lazo eléctricamente pequeña y antena de lazo eléctricamente grande. Si la circunferencia total del lazo es muy pequeña, en comparación a la longitud de onda ( $\lambda \ll L$ ), entonces se dice que la antena de lazo es eléctricamente pequeña. En una antena de lazo eléctricamente grande, la circunferencia es cercana a la longitud de onda. El patrón de radiación de los campos lejanos de la antena de lazo pequeño, es insensible a la forma de la antena [12].

Figura 12. Antena de lazo.

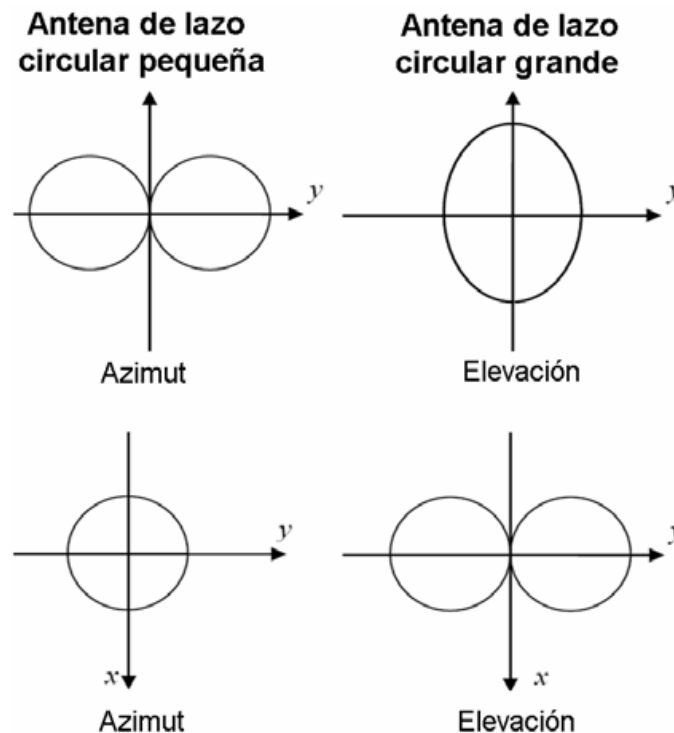


Fuente. Buenrostro Rocha Sergio, Metodología para el diseño y construcción de una antena microcinta en la banda de wimax a 3,5 GHz, Tijuana-Mexico, 2007, Trabajo de grado (Maestro en ciencias), Instituto Politécnico Nacional.



Como se muestra en la figura 13, los patrones de radiación son idénticos a los del dipolo, a pesar de que el dipolo está polarizado verticalmente, mientras que el lazo pequeño circular tiene una polarización horizontal.

Figura 13. Patrón de radiación de antenas de lazo.



Fuente. Buenrostro Rocha Sergio, Metodología para el diseño y construcción de una antena microcinta en la banda de wimax a 3,5 GHz, Tijuana-Mexico, 2007, Trabajo de grado (Maestro en ciencias), Instituto Politécnico Nacional.

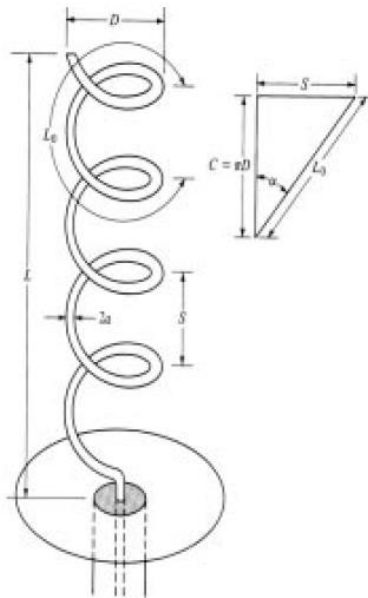
El desempeño de la antena de lazo, puede incrementarse si se coloca una ferrita en el centro de la misma, ya que con esto se incrementa la resistencia de radiación. El patrón de radiación de una antena de lazo grande es diferente al de lazo pequeño. Para una antena de lazo cuadrada de longitud de onda completa, la radiación es máxima en la dirección normal al plano del lazo (a lo largo del eje  $z$ ). En el plano del lazo, existe un nulo en la dirección paralela al plano del alimentador de la antena (a lo largo del eje  $x$ ), y se tiene un lóbulo en dirección perpendicular al plano del alimentador de la antena (a lo largo del eje  $y$ ). Las antenas de lazo generalmente tienen una ganancia de -2dB a 3dB y un ancho de banda de aproximadamente 10%. La antena de lazo pequeño es muy popular

empleado como antena receptora [12]. Las antenas de lazo de una vuelta son utilizadas en localizadores y los de varias vueltas son utilizados en receptores AM.

### 2.5.3. ANTENA HILICOIDAL

Este tipo de antena, puede diseñarse para una gran cantidad de frecuencias de operación, y puede emplearse en comunicaciones espaciales, en telefonía satelital, GPS, televisión en las bandas UHF y VHF, etc. La antena helicoidal o de hélice consiste de un conductor en forma de pequeños lazos y dipolos conectados en serie en forma circular a lo largo del eje normal a la tierra. Las características de radiación de la antena varían controlando El tamaño de sus propiedades geométricas en comparación a la longitud de onda  $\lambda$  y puede generar la polarización elíptica, lineal y circular. En la figura 14 se muestran distintas características físicas de la antena conocidas como:

Figura 14. Características físicas de la antena helicoidal.



Fuente. Buenrostro Rocha Sergio, Metodología para el diseño y construcción de una antena microcinta en la banda de wimax a 3,5 GHz, Tijuana-Mexico, 2007, Trabajo de grado (Maestro en ciencias), Instituto Politécnico Nacional.

Dónde:

$n$  = Numero de vueltas.

$S$  = Distancia entre vueltas.

$D$  = Diámetro de la hélice.

$L$  = Longitud axial =  $n * S$ .

**C** = Circunferencia de la hélice =  $\pi D$ .  
**L** = Longitud del conductor =  $Lo * n$ .  
**Lo** = Longitud de cada vuelta =  $(\sqrt{S^2 + C^2})$ .  
 **$\alpha$**  = Angulo de inclinación =  $\text{Tan-1}(S/C)$ .  
**a** = Grosor del conductor

## 2.6. TEORIA GENERAL DE LOS MODOS TRANSVERSAL MAGNETICO (TM)

Los modos de TM tiene todo su campo magnético transversal en la dirección axial ( $H_z=0$ ) y una componente ( $E_z \neq 0$ ). La metodología utilizada para encontrar la expresiones matemáticas de las componentes de los campos **E** y **H** estos modos es análoga a la utilizada para calcular los modos del **TE**. Partiendo de las ecuaciones fundamentales con  $H_z=0$ , se obtiene una ecuación similar, solo que ahora la variable a encontrar es  $E_z$ :

$$\partial^2 E_z / (\partial x^2) + \partial^2 E_z / (\partial y^2) = \frac{\partial E_z}{\partial z} = (\gamma^2 + \omega^2 \mu \epsilon) E_z = 0 \quad (2.22)$$

Y las demás componentes de los campos se determinan con las expresiones siguientes:

$$E_x = -\frac{\gamma}{\gamma^2 + \omega^2 \mu \epsilon} * \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (2.23)$$

$$E_y = -\frac{\gamma}{\gamma^2 + \omega^2 \mu \epsilon} * \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (2.24)$$

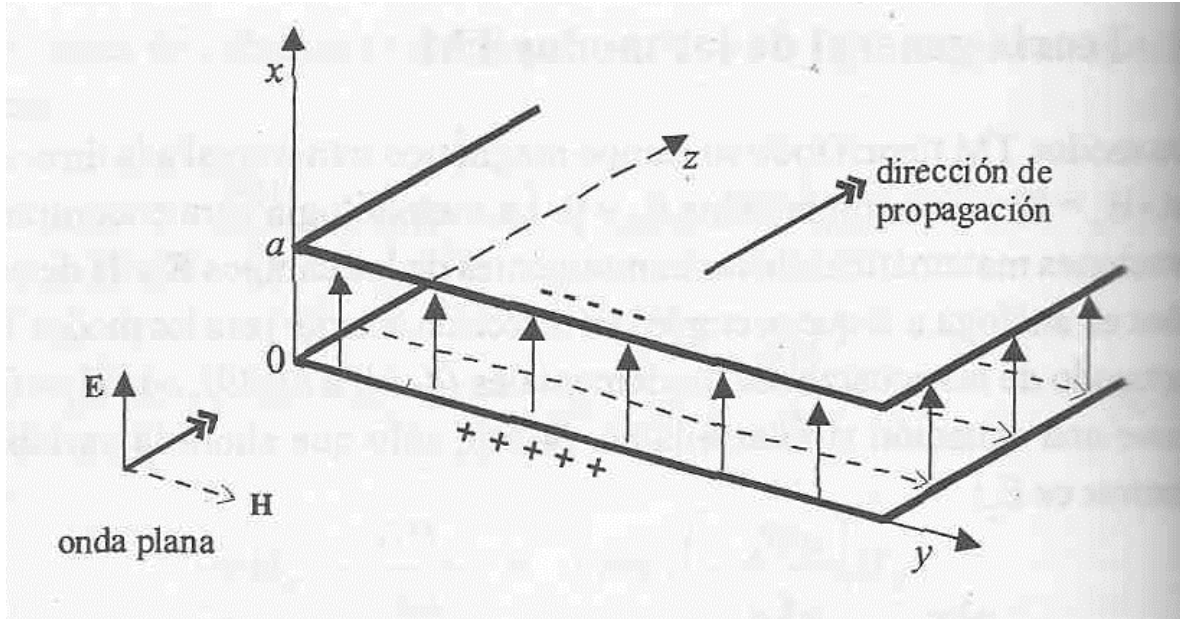
$$H_x = -\frac{j\omega \epsilon}{\gamma} * E_y \quad (2.25)$$

$$H_y = \frac{j\omega \epsilon}{\gamma} * E_x \quad (2.26)$$

### 2.6.1. GUIA DE DOS PLACAS PARALELAS

El análisis de un sistema de transmisión integrado por dos placas paralelas es sencillo dentro del grupo de las guías de onda y, además ofrece una buena visualización introductoria sobre los efectos de propagación dentro de una guía.

Figura 15. Sistema de dos placas paralelas que atrapa una porción de una onda plana incidente.



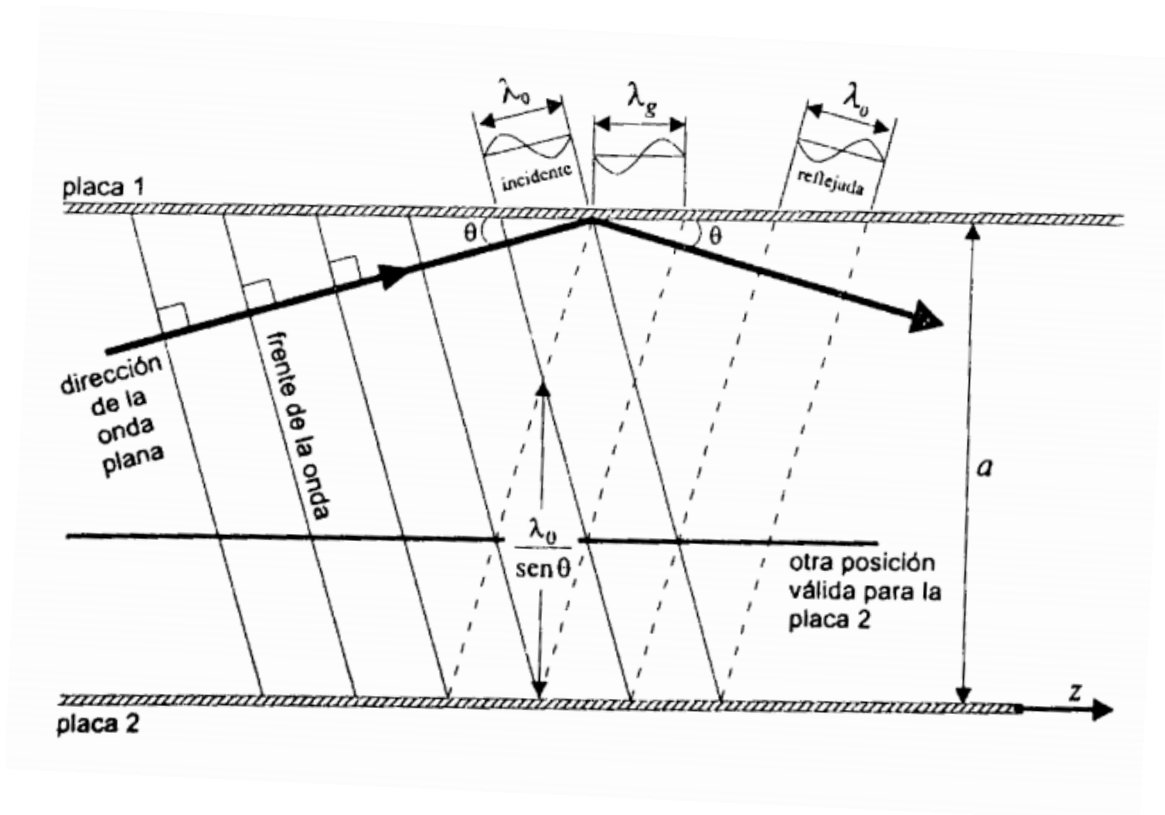
Fuente. Rodolfo Neri Vela, *Líneas de Transmisión*, McGraw-Hill.,1999.

Consideramos inicialmente que una onda plana viaja en la dirección z y dos placas paralelas perfectamente conductoras orientadas como se muestra en la figura 15.

Como las placas son perpendiculares al campo eléctrico incidente de la onda plana, no afectan en absoluto su distribución, ya que debe cumplirse la condición de frontera de que el campo eléctrico tangencial en las superficies conductoras sea igual a cero. Es decir, el campo eléctrico solo puede ser normal a las placas, dirección que coincide con el campo eléctrico de la onda plana incidente. Por su parte, el campo magnético dentro de las dos placas formadas forma noventa grados con el campo eléctrico y con la dirección z, igual que el caso de la onda plana.

Dicho de otra forma, la onda que se propaga entre dos placas también es TEM, y la distribución de los campos es igual a la de la onda plana original, como si las placas no existieran. Una porción de la onda plana es atrapada en el interior de las placas, y se sigue propagando a lo largo de la dirección z con las mismas características que las de una onda plana (o al menos muy aproximadamente, pues en la práctica los conductores no son perfectos). Por lo tanto, dos placas paralelas forman dos guías de onda. El modo TEM de propagación dentro de las dos placas es el modo fundamental de transmisión de la guía y existe para toda frecuencia de operación. [17]

Figura 16. Propagación de una onda entre dos placas paralelas.



Fuente. Rodolfo Neri Vela, *Líneas de Transmisión*, McGraw-Hill., 1999.

$$a = \frac{n}{2} * \frac{\lambda_0}{\text{sen} \theta} \quad (2.27)$$

$$\lambda_c = \frac{2a}{n} \quad (2.28)$$

$$f_c = \frac{c}{\lambda_c} = (cn/2a) \quad (2.29)$$

Donde

$\lambda_0$  = Longitud de onda característica

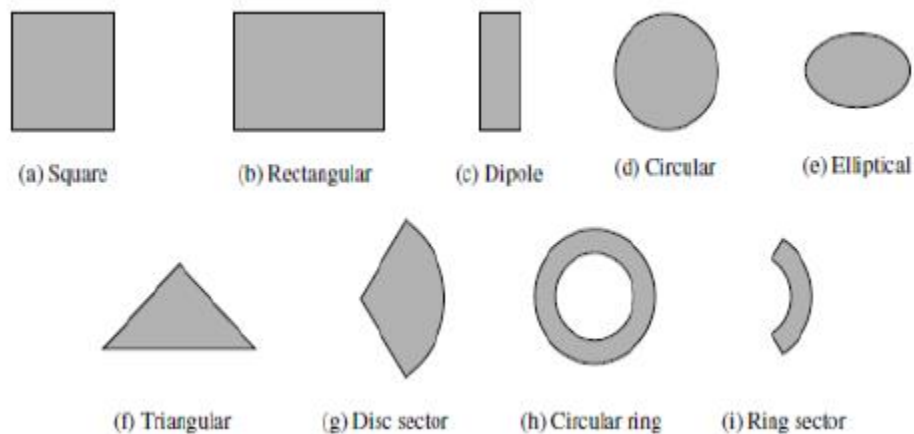
$\lambda_c$  = Longitud de onda de corte

$f_c$  = Frecuencia de corte

### 3. ANTENAS MICROSTRIP.

Las antenas con tecnología microstrip muchas veces son referenciadas como antenas tipo parche, las cuales consisten en un parche que puede tener cualquier geometría plana, por ejemplo, rectangular, circular, cuadrado, línea finita o dipolo, elíptico, anillo, anillo circular, triangular, entre otros. El parche es hecho con un conductor (cobre u oro) muy delgado, colocado sobre un plano conductor de tierra separados por un sustrato dieléctrico. La geometría y el diseño del parche depende de la aplicación que se requiera, estos diseños pueden ir desde un simple parche rectangular hasta diseños fractales.

*Figura 17. Topología de parches*



*Fuente Constantine A. Balanis., Antenna Theory, Analysis And Design., Tercera Ed, John Wiley y Sons., 2005.*

Estos parches se pueden adaptar a la superficie que se desee, plana o no plana, siendo estas simples y baratas de fabricar utilizando tecnología moderna de circuitos impresos. Algunas de las desventajas de este tipo de antenas son: presentan modos de alto orden, tienen baja eficiencia, ancho de banda estrecho, baja pureza de polarización y excitan ondas de superficie, sin embargo, existen diferentes métodos por los cuales se puede mejorar la eficiencia y ancho de banda, que conviene tener en cuenta y en su caso eliminar. [18]

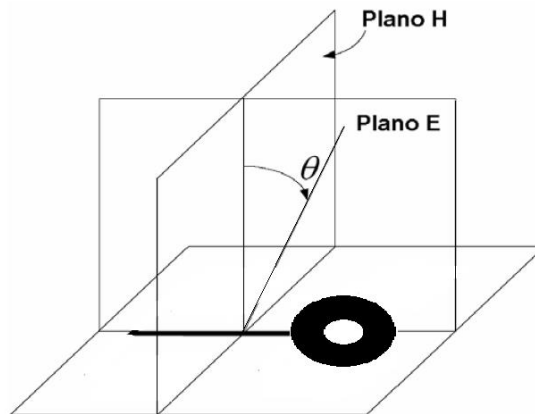
Este tipo de antenas encuentran aplicación en las naves espaciales de alto rendimiento, aviones, y misiles vía satélite, aplicaciones móviles, donde el tamaño, el peso, el costo, el rendimiento, la facilidad de instalación y el perfil aerodinámico son limitados. En la actualidad, hay muchas aplicaciones gubernamentales y comerciales, tales como la radio móvil y comunicaciones inalámbricas que tienen características similares donde se pueden usar este tipo de antenas. También se

utilizan en redes de área local inalámbricas (WLAN) para proporcionar conexiones de datos de alta velocidad y de corto alcance entre dispositivos móviles y puntos de acceso inalámbricos [19].

### 3.1. PROPAGACION ELECTROMAGNETICA EN ANTENAS MICROSTRIP

En una antena parche, la amplitud de la corriente de superficie resulta significativamente cuando la señal de la frecuencia de operación es cercana a la frecuencia de resonancia [16]. Cuando el parche radia, se tienen los patrones de radiación de los campos eléctricos y magnéticos, denominados como plano magnético y eléctrico, y se encuentran relacionados al flujo de la corriente eléctrica. A continuación se muestran estos planos

*Figura 18. Plano E y plano H.*



*Fuente. Autor.*

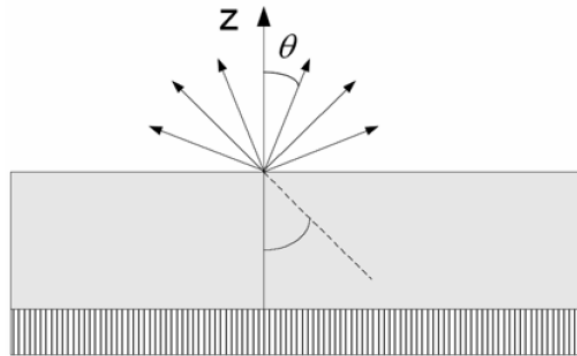
Dependiendo de la dirección de propagación de las ondas, estas se clasifican en cuatro categorías, ondas espaciales, ondas superficiales, ondas de fuga y ondas guiadas.

#### 3.1.1. ONDAS ESPACIALES

También se les llama ondas radiadas, se transmiten hacia el espacio con ángulos de elevación  $\theta$  entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , desplazándose al espacio libre, donde las

amplitudes de los campos decrecen con la distancia  $r$  de propagación. Este fenómeno es importante en las antenas, pero es indeseado en las líneas de transmisión planares y se representan como espurias [19]. Las ondas radiadas son predominantes cuando la antena se construye en substratos con permitividad pequeña y espesor grueso comparado con la longitud de onda. En la figura 19 se muestra este fenómeno de radiación.

*Figura 19. Ondas espaciales.*



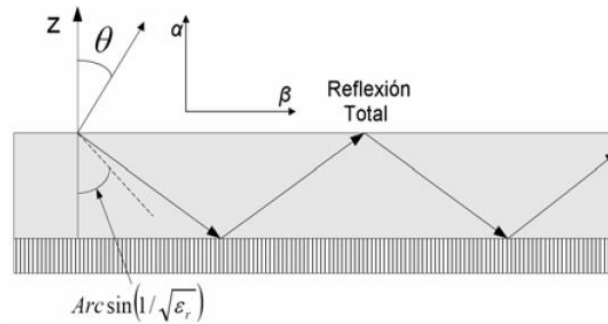
*Fuente. Buenrostro Rocha Sergio, Metodología para el diseño y construcción de una antena microcinta en la banda de wimax a 3,5 GHz, Tijuana-Mexico, 2007, Trabajo de grado (Maestro en ciencias), Instituto Politécnico Nacional.*

### **3.1.2. ONDAS DE SUPERFICIE.**

Las ondas de superficie son ondas transmitidas con ángulos de elevación entre  $180^\circ$  y  $180^\circ - \sin^{-1}(1/\sqrt{\epsilon_r})$ . A lo largo de la trayectoria de propagación, las ondas inciden con el plano de tierra reflejándose hacia la frontera aire-substrato, donde también se vuelven a reflejar. Las amplitudes del campo que se generan con ángulos de incidencia particulares, permiten la excitación de un conjunto discreto de modos de onda superficial, similar a los de una pared metálica de una guía de onda [16]. Este tipo se propagan como se muestra en la figura 20.



Figura 20. Ondas de superficie.

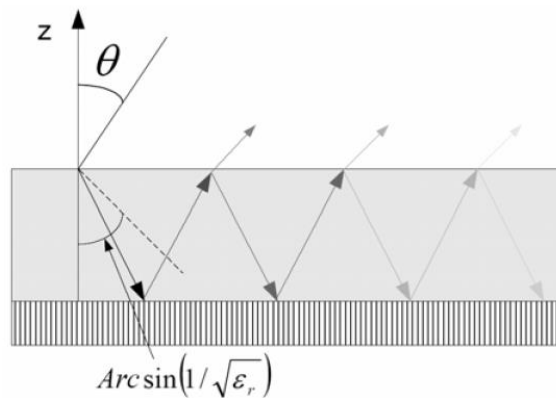


Fuente. Buenrostro Rocha Sergio, Metodología para el diseño y construcción de una antena microcinta en la banda de wimax a 3,5 GHz, Tijuana-Mexico, 2007, Trabajo de grado (Maestro en ciencias), Instituto Politécnico Nacional.

### 3.1.3. ONDAS DE FUGA

Las ondas de fuga son aquellas que se introducen con un ángulo entre  $90^\circ - \sin^{-1}(1/\sqrt{\epsilon_r})$  y  $180^\circ$ . Estas ondas son reflejadas en el plano de tierra y posteriormente en la frontera aire-substrato. Las ondas de fuga son ondas planas no uniformes y se pueden observar en la figura 21. Eventualmente contribuyen con la radiación, y por lo tanto se presenta el fenómeno de desvanecimiento de la onda, con respecto a la dirección del frente de onda. Este fenómeno es aprovechable en las antenas multi-capas, proporcionando una mayor ganancia [16].

Figura 21. Ondas de fuga.

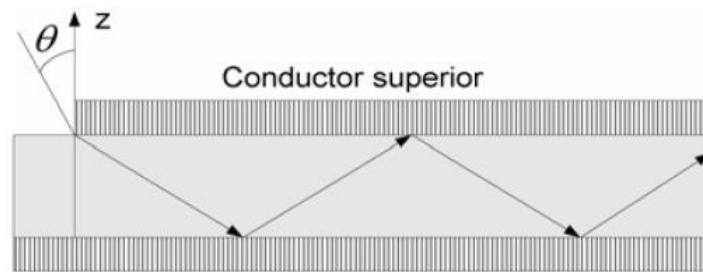


Fuente. Buenrostro Rocha Sergio, Metodología para el diseño y construcción de una antena microcinta en la banda de wimax a 3,5 GHz, Tijuana-Mexico, 2007, Trabajo de grado (Maestro en ciencias), Instituto Politécnico Nacional.

### 3.1.4. ONDAS GUIADAS

Al agregar un conductor en la parte superior del substrato dieléctrico, se modifican las condiciones de frontera de la propagación, ya que las ondas se reflejan entre el plano de tierra y el conductor a través del dieléctrico, los cuales forman una guía de onda de planos paralelos. Las ondas dentro de la guía metálica existen solo para algunos valores particulares del ángulo de incidencia de la onda, como se muestra en la figura 22. Las ondas guiadas proporcionan la operación normal de todas las líneas de transmisión en circuitos, en donde el campo electromagnético se concentra en la vecindad de los conductores. Por otro lado, esta concentración de energía electromagnética es desfavorable para las antenas.

Figura 22. Ondas guiadas.

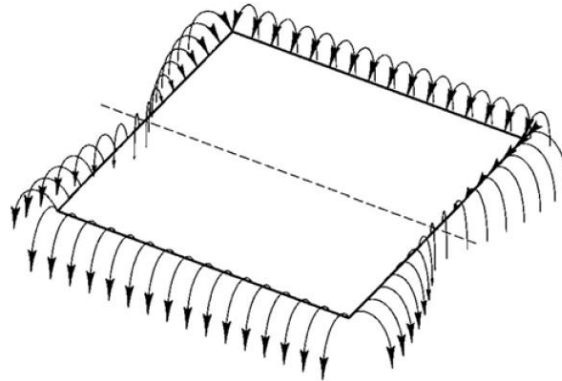


Fuente. Buenrostro Rocha Sergio, Metodología para el diseño y construcción de una antena microcinta en la banda de wimax a 3,5 GHz, Tijuana-Mexico, 2007, Trabajo de grado (Maestro en ciencias), Instituto Politécnico Nacional.

### 3.2. FRINGING FIELDS (EFECTOS DE BORDE)

El efecto de borde se debe a la extensión de los campos, tanto en el largo como en el ancho de los parches. Dicha extensión depende de las dimensiones del parche, el espesor del dieléctrico  $h$  y de la constante dieléctrica  $\epsilon_r$ . Este efecto de borde debe tomarse en cuenta para el cálculo de la frecuencia de resonancia y se puede observar en la figura 23[14], en donde se observan los campos eléctricos extendiéndose más allá de los bordes del parche.

Figura 23. Efectos de borde.

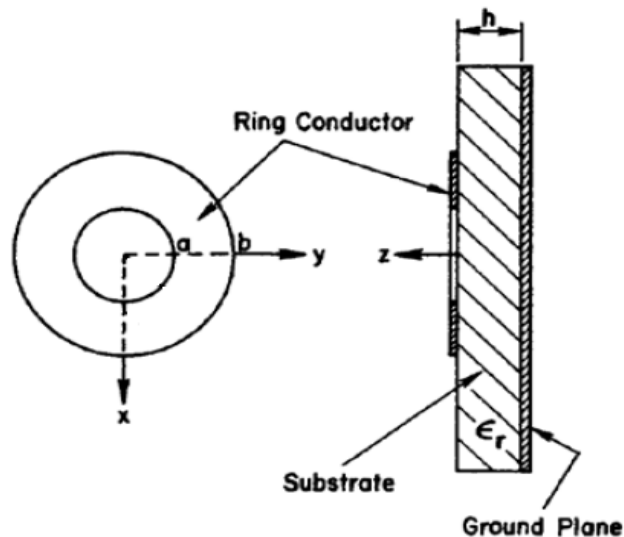


Fuente. Buenrostro Rocha Sergio, Metodología para el diseño y construcción de una antena microcinta en la banda de wimax a 3,5 GHz, Tijuana-Mexico, 2007, Trabajo de grado (Maestro en ciencias), Instituto Politécnico Nacional.

#### 4. ANTEANA MICROSTRIP CON TOPOLOGIA ANILLO CIRCULAR

Mientras que los parches rectangulares y circulares son probablemente las formas más ampliamente estudiadas, el anillo circular o anular también ha recibido una atención considerable. Hay varias características interesantes asociados con este parche:

Figura 24. Antena anillo circular.



Fuente. Rajesh Kumar, Dr. D. C. Dhubkarya, Design and Analysis of Circular Ring Microstrip Antenna, H.O.D, Deptt.of E&C Engg. B.I.E.T, Member IEEE, Asstt. Professor, SIT., 2011

En primer lugar, para una frecuencia dada, el tamaño es sustancialmente menor que la del parche circular cuando ambos están manejando el modo más bajo de operación. En aplicación de arreglos, esto permite que los elementos que se encuentran con mayor densidad, lo que reduce el problema de los grating-lobe (lóbulos de rejilla). En segundo lugar, es posible combinar el anillo anular con un segundo elemento de microcinta, tal como un disco circular dentro de su abertura, para formar un sistema de antena de doble banda compacta [20]. En tercer lugar, la separación de los modos de operación puede ser controlada por la relación de los radios externo e interno. Por último, se ha encontrado que, al operar en uno de los modos de orden superior, es decir,  $TM_{12}$ , la impedancia y el ancho de banda es varias veces más grande que lo que se puede lograr en otros parches con espesores dieléctricos comparables [20]

La estructura de anillo circular se estudió por primera vez por Bergman y Schultz en 1955 como una antena de ondas viajeras. También se ha utilizado como un resonador y como un radiador en aplicaciones médicas [21]. Al igual que muchas formas de parches microstrip, el anillo circular ha recibido una atención considerable. Cuando se opera en su modo fundamental ( $TM_{11}$ ), esta antena impresa es más pequeña que sus contrapartes rectangulares o circulares. El anillo anular también puede aumentar un poco su ancho de banda en la naturaleza cuando se opera cerca de la resonancia  $TM_{12}$ , [22]. Se ha demostrado en cuanto a la estructura que es un buen resonador (con muy poca radiación) para los modos de  $TM_{1m}$  (m impar), y un buen radiador para los modos  $TM_{1m}$  (m par).[23]

#### **4.1. MODELO DE ANALISIS:**

##### **4.1.1. MODELO DE CAVIDADES**

El modelo de cavidades fue desarrollado por Solomon Y. y W.F. Richards (1979) y soporta una mayor cantidad de topologías de parches que el de línea de transmisión (rectangulares, circulares ó triangulares). En este modelo el parche se considera como una cavidad resonante cerrada con paredes magnéticas y eléctricas. El conductor y el plano de tierra son las paredes eléctricas, mientras que los bordes representan las paredes magnéticas. Este modelo tiene la ventaja de presentar resultados de la frecuencia de resonancia más cercanos a los resultados experimentales, que los obtenidos por el método de línea de transmisión. [23]

El método de cavidades para la antena anillo circular se obtiene mediante la sustitución de su perímetro con paredes magnéticas como lo exige el método. Debido a que no existen variaciones de los campos a lo largo de la dirección z para sustratos finitos, los modos se designan como modos  $TM_{nm}$ . Cuando no se

presenta corriente de excitación en el parche, la ecuación de onda del campo eléctrico se puede escribir como:

$$(\nabla^2 + k^2)\vec{E} = 0 \quad (4.1)$$

Donde

$$k = 2\pi \sqrt{\epsilon_r / \lambda_0} \quad (4.2)$$

Solucionando la ecuación 4.1 en coordenadas cilíndricas

$$E_z = E_0 [J_n(k\rho)Y'_n(ka) - J'_n(ka)Y_n(k\rho) \cos n\varphi] \quad (4.3)$$

Y

$$H_\rho = \frac{j}{\omega\mu\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} \quad H_\varphi = \frac{-j}{\omega\mu} \frac{\partial E_z}{\partial \rho} \quad (4.4)$$

$J_n()$  corresponde a la función de Bessel de primera clase y orden  $n$ ,  $Y_n()$  corresponde a la función de Bessel de segunda clase con orden  $n$ ,  $J'_n$  y  $Y'_n$  son sus primeras derivadas respectivamente. Los demás componentes de campo presentes en la cavidad equivalen a cero; la corriente superficial presente en el parche tipo anillo circular está dada por

$$\vec{J}_s = -\hat{z} \times \vec{H} = -\hat{\varphi}H_\rho + \hat{\rho}H_\varphi \quad (4.5)$$

$$J_\varphi = \frac{jnE_0}{\omega\mu\rho} [J_n(k\rho)Y'_n(ka) - J'_n(ka)Y_n(k\rho) \sin n\varphi] \quad (4.6a)$$

$$J_\rho = \frac{-jnE_0}{\omega\mu} [J'_n(k\rho)Y'_n(ka) - J'_n(ka)Y'_n(k\rho) \cos n\varphi] \quad (4.6b)$$

Considerando un anillo circular de radio interior ( $a$ ), radio exterior ( $b$ ) y suponiendo que solo existen modos transversales magnéticos de operación  $TM_{nm}$ , la componente radial de la corriente de superficie desaparece a lo largo de los

bordes en  $\rho = a$  y  $\rho = b$ , esto para satisfacer las condiciones en sus fronteras de paredes magnéticas, se puede expresar

$$J_\rho(\rho = b) = H_\phi(\rho = b) = 0 \quad (4.7)$$

Aplicando la expresión 4.7 se obtiene la ecuación característica para los modos resonantes de una antena microstrip con topología anillo circular

$$J'_n(kb)Y'_n(ka) - J'_n(ka)Y'_n(kb) = 0 \quad (4.8)$$

Como ya se explicó con anterioridad,  $J'_n$  y  $Y'_n$  equivalen a la primera derivada de la función de Bessel de primera y segunda clase, orden n, respectivamente.

En este proyecto, se trabajó con una relación entre los radios del anillo igual a dos para efectos de pruebas y se nombró a esta relación con la letra C, es decir  $C = b/a = 2$ , aplicando a la ecuación 4.8 y dejando la expresión en función del modo de trabajo transversal magnético  $TM_{nm}$  tenemos que

$$X_{nm} = k_{nm}a \quad (4.9a)$$

$$J'_n(CX_{nm})Y'_n(X_{nm}) - J'_n(X_{nm})Y'_n(CX_{nm}) = 0 \quad (4.9b)$$

Con las condiciones de  $C = 2$ , se obtienen las raíces  $X_{nm}$  de la ecuación 4.9b

Tabla 1. Raíces  $X_{nm}$  de la ecuación 4.9b.

m	n	1	2	3	4	5
0	---	---	3,1966	6,3123	9,4445	12,5812
1	0,6773	3,2825	6,3532	9,4713	12,6012	
2	1,3409	3,5313	6,4747	9,5516	12,6612	
3	1,9789	3,9201	6,6738	9,6842	12,7607	
4	2,5876	4,4182	6,9461	9,8677	12,8989	
5	3,1694	4,9929	7,2868	10,1	13,075	

Fuente. J. R. James and P. S. Hall (Editors), *Handbook of microstrip antennas*, vol. 28, pp. 169-183, 1989.

Se obtiene la frecuencia de resonancia

$$f_{nm} = \frac{X_{nm}c}{2\pi a\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.10)$$

Donde

$c$  =Velocidad de la luz en el espacio libre.

$a$  =Radio interior del anillo circular.

$\epsilon_r$  =Constante dieléctrica del substrato.

La ecuación anterior propuesta para la frecuencia de resonancia no tiene en cuenta los efectos de borde de los campos (fringing fields), esto afecta la frecuencia de radiación haciéndola menor que la del valor deseado, para resolver este problema y mejorar la precisión, se utiliza la constante dieléctrica del substrato efectiva  $\epsilon_{ref}$ .

$$f_{nm} = \frac{X_{nm}c}{2\pi a\sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (4.11)$$

Para determinar el valor de  $\epsilon_{ref}$ , se modela el anillo como una línea microstrip doblada en forma circular, para que el efecto de la curva en la frecuencia de resonancia sea despreciable, el radio de curvatura debe ser mucho mayor en comparación al ancho de la línea conductora propuesta

$$\epsilon_{ref} = \frac{1}{2}(\epsilon_r + 1) + \frac{1}{2}(\epsilon_r - 1)\left(1 + \frac{10h}{(b-a)}\right)^{-1/2} \quad (4.12)$$

Donde

$a$ =Radio interior del anillo circular.

$b$ =Radio exterior del anillo circular.

$h$  =Espesor del dieléctrico.

Además, para tener en cuenta los fringing fields existentes a lo largo de los bordes curvados del anillo circular, se sugieren los radios exterior e interior

$$b_{ef} = b + \frac{1}{2}(W_e(f) - W) \quad (4.13a)$$

$$a_{ef} = a - \frac{1}{2}(W_e(f) - W) \quad (4.13b)$$

Donde

$$W_e(f) = W + \frac{W_e(0) - W}{1 + (f/f_p)^2}$$

$$W_e(0) = 120\pi h / z_0 \sqrt{\epsilon_{ref}}$$

$$f_p = z_0 / 2\mu_0 h$$

$\mu_0$  corresponde a la permeabilidad y  $z_0$  a la impedancia de la línea microstrip de ancho W propuesta (b-a).

Empíricamente también se pueden hallar los radios del anillo circular

$$a_{ef} = a - \frac{3}{4}(h) \quad (4.14a)$$

$$b_{ef} = b + \frac{3}{4}(h) \quad (4.14b)$$

Es aconsejable para la corrección de los fringing fields, utilizar siempre en la fórmula de frecuencia de resonancia la constante dieléctrica efectiva  $\epsilon_{ref}$  y los radios efectivos  $a_{ef}$  y  $b_{ef}$ . Esto es algo diferente de los casos de la circular, la rectangular y los parches equitriangular, que incluyen las dimensiones efectivas solamente. Lee y Dahele [20] habían demostrado que, en el caso del anillo circular, se puede obtener una buena concordancia entre la teoría y la experimentación sólo si se utilizan ambas cantidades efectivas.

El campo eléctrico presente bajo el parche anillo circular se obtienen de la expresión

$$E_z = E_0 [J_n(k_{nm}\rho)Y'_n(k_{nm}a) - J'_n(k_{nm}a)Y_n(k_{nm}\rho)] \cos n\psi \quad (4.15)$$

$$E_\theta = \frac{j^n 2hk_0 E_0}{\pi k_{nm}} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \cos n\phi [J'_n(k_0 a \sin\theta) - J'_n(k_0 b \sin\phi) \times \frac{J'_n(k_{nm}a)}{J'_n(k_{nm}b)}] \quad (4.16)$$

$$E_\phi = \frac{-j^n 2nhE_0}{\pi k_{nm}} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \frac{\cos\theta \sin\phi}{\sin\theta} \left[ \frac{J_n(k_0 a \sin\theta)}{a} - \frac{J_n(k_0 b \sin\theta)}{b} \times \frac{J'_n(k_{nm}a)}{J'_n(k_{nm}b)} \right] \quad (4.17)$$



Donde

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$k_{nm} = \frac{X_{nm}}{a}$$

$\lambda = \frac{c}{f}$ , siendo c la velocidad de la luz en el espacio libre.

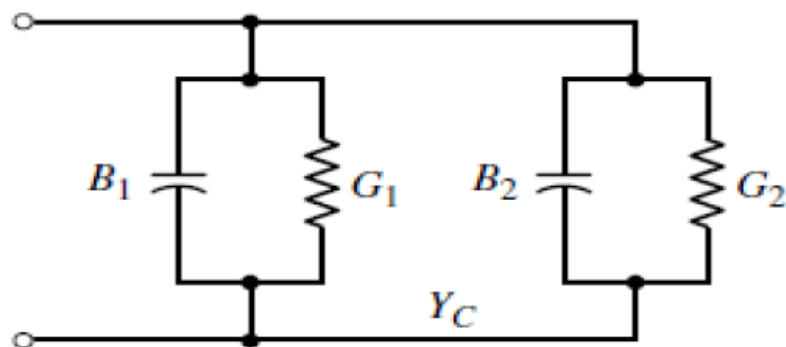
Usando las ecuaciones 4.16 y 4.17, se puede graficar el diagrama de radiación para cualquier modo de operación  $TM_{nm}$ .

#### 4.1.2. MODELO DE LINEA DE TRANSMISION.

Aunque el modelo de línea de transmisión sólo soporta parches rectangulares, para este proyecto fue utilizado en el diseño de las líneas que componen el acople de impedancias, ya que se modela el parche anillo circular como un parche rectangular para hallar la impedancia de entrada aproximada del parche y partiendo de esta diseñar las líneas que componen la alimentación. El modelo de línea de transmisión trata al parche radiador como una línea resonante con variaciones transversales del campo. Las variaciones del campo y la resonancia del parche, se determinan por la longitud del parche que comúnmente es de media longitud de onda [24].

Para hallar la impedancia de entrada del parche anillo circular partiendo de este modelo, se debe analizar el modelo, teniendo en cuenta que las ranuras son consideradas como admitancias complejas (Y) compuestas de una conductancia (G) y una susceptancia (B) en paralelo [18] como se muestra en la figura 25

Figura 25. Circuito equivalente de una antena microstrip.



Fuente. J. R. James and P. S. Hall (Editors), *Handbook of microstrip antennas*, vol. 28, pp. 169-183, 1989.

Desarrollando el circuito anterior, tenemos que

$$Y_c = G_1 + jB_1 \quad (4.18)$$

$$G_1 = \frac{W}{120\lambda_0} \left[ 1 - \frac{1}{24} (k_0 h)^2 \right] \quad , para, \quad \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10} \quad (4.18a)$$

$$B_1 = \frac{W}{120\lambda_0} [1 - 0.636 \ln(k_0 h)] \quad , para, \quad \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10} \quad (4.18b)$$

La admitancia y la impedancia total de entrada están dadas por

$$Y_{in} = Y_1 + \tilde{Y}_2 = 2G_1 \quad (4.19)$$

$$Z_{in} = \frac{1}{Y_{in}} = R_{in} = \frac{1}{2G_1} \quad (4.20)$$

El ancho de una línea microstrip ( $W_0$ ) se puede calcular mediante la siguiente ecuación [18]

$$Z_x = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{ref}}} \ln \left[ \frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h} \right] \quad , para, \quad \frac{W_0}{h} \leq 1 \quad (4.21a)$$

$$Z_x = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{ref}} \left[ \frac{W_0}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{W_0}{h} + 1.444 \right) \right]} \quad , para, \quad \frac{W_0}{h} > 1 \quad (4.21b)$$

Donde

$Z_x$  = Impedancia de la línea microstrip a la que se desea calcular el ancho ( $W_0$ ).

Partiendo del modelo de Wheeler H.A [25] propuesto en 1977 se pueden calcular también el largo y ancho de una línea microstrip

$$WL = \frac{4h}{\frac{e^A}{2} - e^{-A}}, \text{ para, } \frac{W}{h} \leq 2 \quad (4.22a)$$

$$WL = h \left[ \frac{\epsilon_r - 1}{\pi \epsilon_r} \left( \log(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_1} \right) + \frac{2}{\pi} (B - 1 - \log(2B - 1)) \right] \text{ , para, } \frac{W}{h} \geq 2 \quad (4.22b)$$

Donde

$$A = \sqrt{2\epsilon_r + 1} \left( \frac{\pi Z_x}{\eta} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \frac{0.23 + 0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (4.23)$$

$$B = \frac{\pi \eta}{2 Z_x \sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.24)$$

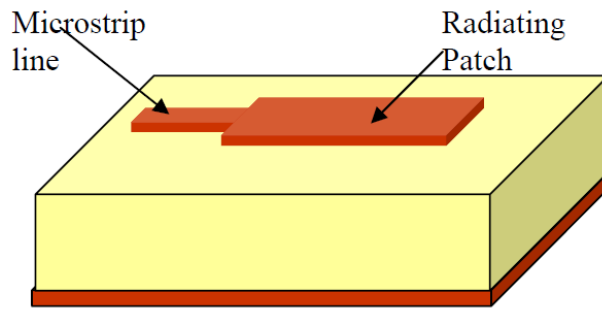
## 4.2. ALIMENTACION DEL PARCHÉ POR EL METODO DE LINEA MICROSTRIP

Existen dos formas de alimentar a un parche como elemento radiador, los que hacen contacto y los que no hacen contacto con el parche. Dentro de los métodos que no hacen contacto con el parche, la transferencia de potencia se realiza mediante un acoplamiento magnético entre la línea microstrip y el parche, mientras que en los métodos que hacen contacto con el parche, la transferencia de potencia se hace por medio de una línea microstrip o coaxial y un acople de impedancias.

Para el desarrollo de este proyecto, se utilizó el método de alimentación por contacto llamado Línea Microstrip. En esta técnica, una línea conductora se conecta directamente al borde del parche radiador en forma de anillo circular como se muestra en la figura 26. El ancho de la línea es más angosta comparada con el parche y como es una estructura plana, se tiene la ventaja que la línea se puede imprimir sobre el mismo sustrato. La impedancia de entrada del parche debe acoplarse a una impedancia de una línea característica de  $50\Omega$  por medio de otra línea microstrip.

La alimentación puede estar centrada o descentrada a lo ancho del parche, y dependiendo de la ubicación del punto de alimentación, se determina el modo electromagnético. La introducción de la línea de alimentación provoca un desplazamiento en la frecuencia de resonancia pero el patrón de radiación permanece inalterado [26].

Figura 26. Alimentación por el método de línea microstrip

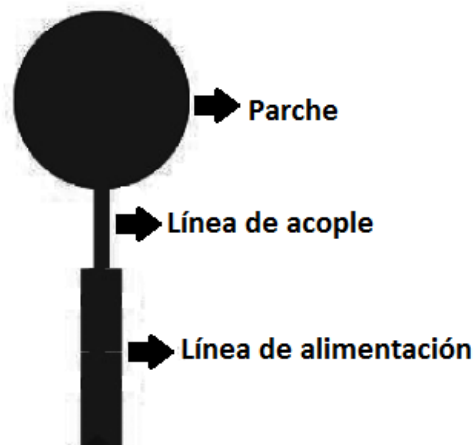


Fuente. MEHMET TAŞTAN., ANALYSIS AND DESIGN OF A CIRCULARLY POLARIZED MICROSTRIP ANTENNA., pp 10., 2006

#### 4.2.1. ACOPLA DE IMPEDANCIAS

Como se explicó en el literal anterior se alimentará el parche anillo circular con el método de línea microstrip, se utilizará una línea de acople con longitud  $\lambda/4$  para adaptar la impedancia de entrada del parche con la impedancia de la línea de alimentación ( $50\Omega$ ). Esta línea de acople se emplea para lograr el acople entre una impedancia de entrada (fuente) puramente resistiva a una impedancia real de salida (carga) [27]. En la figura 27 se observa el acople

Figura 27. Acople de impedancias.



Fuente. Autor.

La impedancia característica de la línea de acople está dada por [27]

$$Z_L = \sqrt{Z_c Z_{in}} \quad (4.23)$$

Donde

$Z_L$  = Impedancia de la línea de acople.

$Z_{in}$  = Impedancia de entrada del parche.

$Z_c$  = Impedancia de la línea de alimentación.

## 5. METODOLOGÍA DE DISEÑO.

En esta sección se describe la metodología que se llevó a cabo para el desarrollo del proyecto, la investigación, el diseño y simulación de la antena así como la construcción de la misma y el análisis de los resultados obtenidos tanto teórica como experimentalmente. Este proyecto estudia una antena con tecnología microstrip anillo circular que debe trabajar en una frecuencia de resonancia de 10GHz.

Anteriormente se mostró el estudio realizado acerca de las antenas con tecnología microstrip, especialmente las que cuentan con topología anillo circular, se profundizó en sus características básicas como el método de diseño, sustratos y modos de operación utilizados.

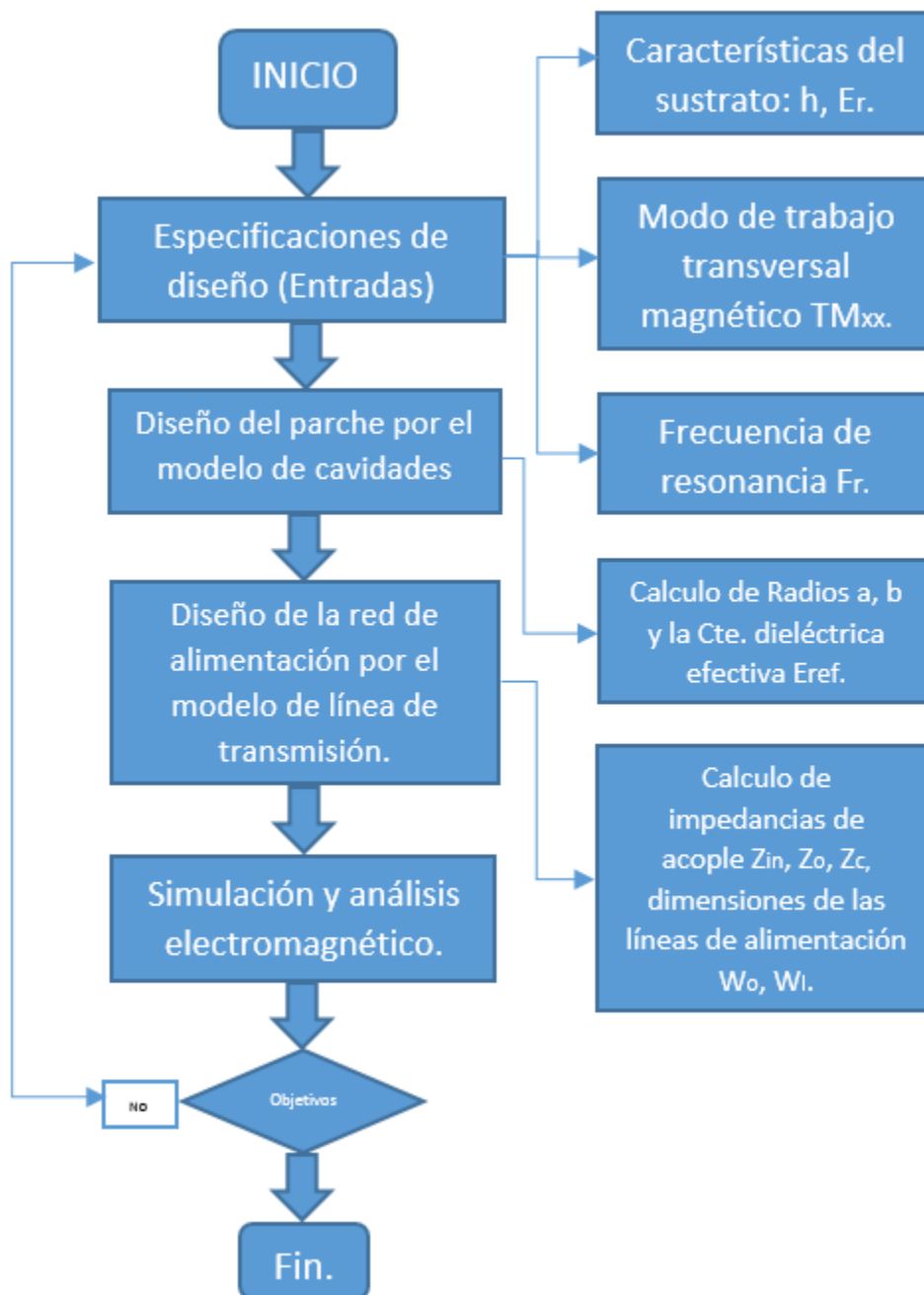
Teniendo en cuenta todos los conocimientos adquiridos acerca del tema principal del proyecto se decidió utilizar el método de cavidades resonantes como modelo fundamental para el diseño de la antena, también se utilizó el modelo de líneas de transmisión para optimizar el diseño de algunos parámetros de la antena como la impedancia de entrada y la alimentación del parche.

En cuanto a el software, se decidió utilizar Wolfram Mathematica® 9 [28] para la simulación de la antena microstrip, el programa calcula los parámetros de la antena y simula el patrón de radiación de la misma partiendo de algunos datos de entrada como: Frecuencia fundamental de trabajo, el modo al que se desea operar, la constante dieléctrica del material, el grosor del sustrato entre otros.

### 5.1. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO.

A continuación se ilustra en un diagrama de flujo las tareas que debe cumplir el simulador y la metodología de diseño de la antena microstrip, enseguida, se explica paso a paso el desarrollo del proyecto.

Figura 28. Diagrama de flujo del diseño de la antena.



Fuente. Autor

Para iniciar el diseño y posterior simulación de la antena se deben conocer como mínimo la frecuencia fundamental de trabajo ( $f_r$ ), el modo Transversal Magnético al que se desea operar ( $TM_{xx}$ ), la constante dieléctrica del material ( $\epsilon_r$ ) y el grosor del sustrato ( $h$ ). Luego se calculan las dimensiones del anillo mediante el modelo de cavidades resonantes propuesto en la sección 4.1.1, para optimización del parche se tienen en cuenta los fringing field a lo largo de los bordes curvados del anillo, se calcula la constante dieléctrica efectiva ( $\epsilon_{ref}$ ) así como los radios efectivos ( $a_{ef}$  y  $b_{ef}$ ) y se trabaja con estos.

Posteriormente se realiza el diseño de la red de alimentación de la antena utilizando el modelo de línea de transmisión propuesto en la sección 4.1.2 para calcular las impedancias que conforman la red de acople, tales como la impedancia de entrada del parche ( $Z_{in}$ ), la impedancia de la línea de alimentación ( $Z_c=50\Omega$ ) y la impedancia de la línea de acople ( $Z_L$ ) [27], así como el ancho y el largo de dichas líneas para lograr una red de acople óptima que permita una máxima transferencia de energía en el parche; se analiza también el punto geométrico óptimo en el que se debe ubicar el puerto de la antena, esto para lograr simetría del patrón de radiación en los campos eléctrico y magnético, pero también puede mejorar otros parámetros. [24]

Se realiza la simulación y el análisis electromagnético de la antena microstrip con las dimensiones calculadas anteriormente con los modelos, en el resultado final se debe tener en cuenta que el parche cumpla con las características deseadas de trabajo, tales como la frecuencia de resonancia, el ancho de banda, la ganancia y por supuesto que sus dimensiones sean construibles físicamente. Si el parche no cumple con las especificaciones deseadas se debe optimizar cambiando el modo de trabajo (TM) o las características del material utilizado.

## **5.2. SELECCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL DIELECTRICO.**

En el mercado se encuentran numerosos sustratos utilizables para el diseño de antenas microstrip, por lo general sus constantes dieléctricas se encuentran dentro del rango  $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ . Los sustratos más gruesos cuya constante dieléctrica está más cercana a 2.2 proporcionan un mayor rendimiento de la antena puesto que mejoran el ancho de banda y la eficiencia. Los elementos radiantes y las líneas de alimentación son por lo general fotograbados sobre el sustrato dieléctrico.

Durante el desarrollo de esta tesis y para la construcción de la antena se utilizaron dos tipos de materiales con constantes dieléctricas y sustratos distintos, con el fin de comprobar y refutar lo que la literatura recomienda, para obtener un mejor ancho de banda, el dieléctrico debe tener un espesor grande y una constante dieléctrica baja, lo más cercana a la del aire [29]. El espesor del

dieléctrico utilizado en antenas de tecnología microstrip está limitado a un rango específico que depende de la frecuencia de trabajo [18]

$$0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0 \quad (5.1)$$

Inicialmente se utilizó el sustrato dieléctrico de referencia FR-4, fabricado con resina poliepóxido de fibra de vidrio, tiene un espesor del dieléctrico  $h=0.8\text{mm}$ , una constante dieléctrica  $\epsilon_r=4.0871$  y unas pérdidas tangenciales  $\tan\delta=0.0182$ .

Posteriormente se utilizó el sustrato de referencia RT/duroid 5880, fabricado por la compañía Rogers con PTFE de fibra de vidrio, tiene un espesor del dieléctrico  $h=0.38\text{mm}$ , una constante dieléctrica  $\epsilon_r=2.2$  y unas pérdidas tangenciales  $\tan\delta=0.0009$  [29]

Para calcular la constante dieléctrica efectiva ( $\epsilon_{\text{ref}}$ ) de los dos materiales se utilizó la ecuación 4.12.

### 5.3. SOFTWARE DE SIMULACIÓN.

Mathematica es el sistema de computación global más poderoso del mundo. Desde su primer lanzamiento en 1988, ha tenido un profundo efecto en la manera de utilizar computadoras en áreas técnicas y otras disciplinas. En 2008, siguiendo su drástica reinención de 2007, Mathematica mantuvo su velocidad innovadora al incorporar grandes áreas de aplicación nuevas a su marco de trabajo integrado. [28]

Este software constituye una herramienta muy potente para la realización de todo tipo de cálculos matemáticos: operaciones aritméticas, cálculo simbólico, gráficos, entre otros tantos. Las últimas versiones del programa incorporan un editor de texto y permiten el manejo de “paletas” de símbolos que facilitan el uso de los comandos e instrucciones del programa y la utilización de la simbología habitual en las fórmulas y operaciones matemáticas.

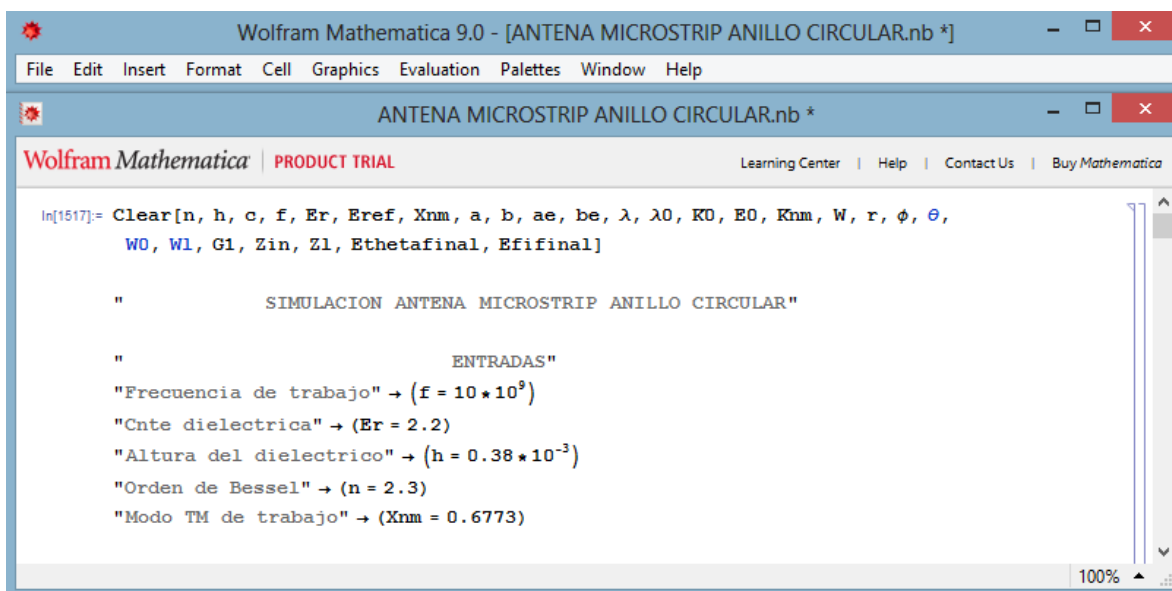
Las ecuaciones de ambos modelos para el diseño de la antena se implementan en un programa desarrollado en el lenguaje de programación Wolfram Mathematica® 9 que se muestra a continuación:

El código tiene como variables de entrada la frecuencia de trabajo, la constante dieléctrica, el orden de la función de Bessel y el modo transversal magnético al



que se desee operar. Estas variable pueden ser cambiadas dependiendo de las características que se desee que tenga la antena anillo circular.

Figura 29. Código propuesto.



The screenshot shows the Wolfram Mathematica 9.0 interface. The title bar reads "Wolfram Mathematica 9.0 - [ANTENA MICROSTRIP ANILLO CIRCULAR.nb \*]". The menu bar includes File, Edit, Insert, Format, Cell, Graphics, Evaluation, Palettes, Window, and Help. The notebook title is "ANTENA MICROSTRIP ANILLO CIRCULAR.nb \*". The Wolfram logo and "PRODUCT TRIAL" are visible on the left, with links for Learning Center, Help, Contact Us, and Buy Mathematica on the right. The code cell contains the following text:

```
In[1517]:= Clear[n, h, c, f, Er, Eref, Xnm, a, b, ae, be, λ, λ0, K0, E0, Knm, W, r, φ, θ,
           W0, W1, G1, Zin, Zl, Ethetafinal, Efifinal]

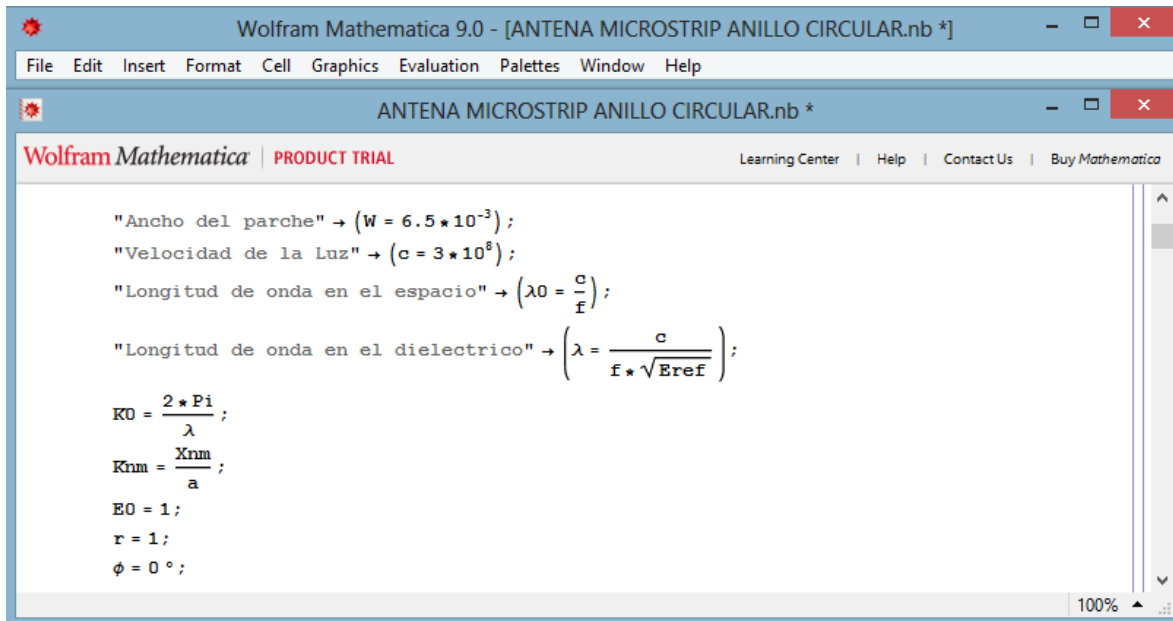
           "          SIMULACION ANTENA MICROSTRIP ANILLO CIRCULAR "

           "          ENTRADAS"
           "Frecuencia de trabajo" → (f = 10 * 109)
           "Cnte dielectrica" → (Er = 2.2)
           "Altura del dielectrico" → (h = 0.38 * 10-3)
           "Orden de Bessel" → (n = 2.3)
           "Modo TM de trabajo" → (Xnm = 0.6773)
```

Fuente. Wolfram Mathematica.

Además, en el código se deben definir algunos parámetros constantes, la velocidad de la luz, la longitud de onda en el espacio y en el dieléctrico, estas constantes son necesarias para que el programa pueda realizar los cálculos.

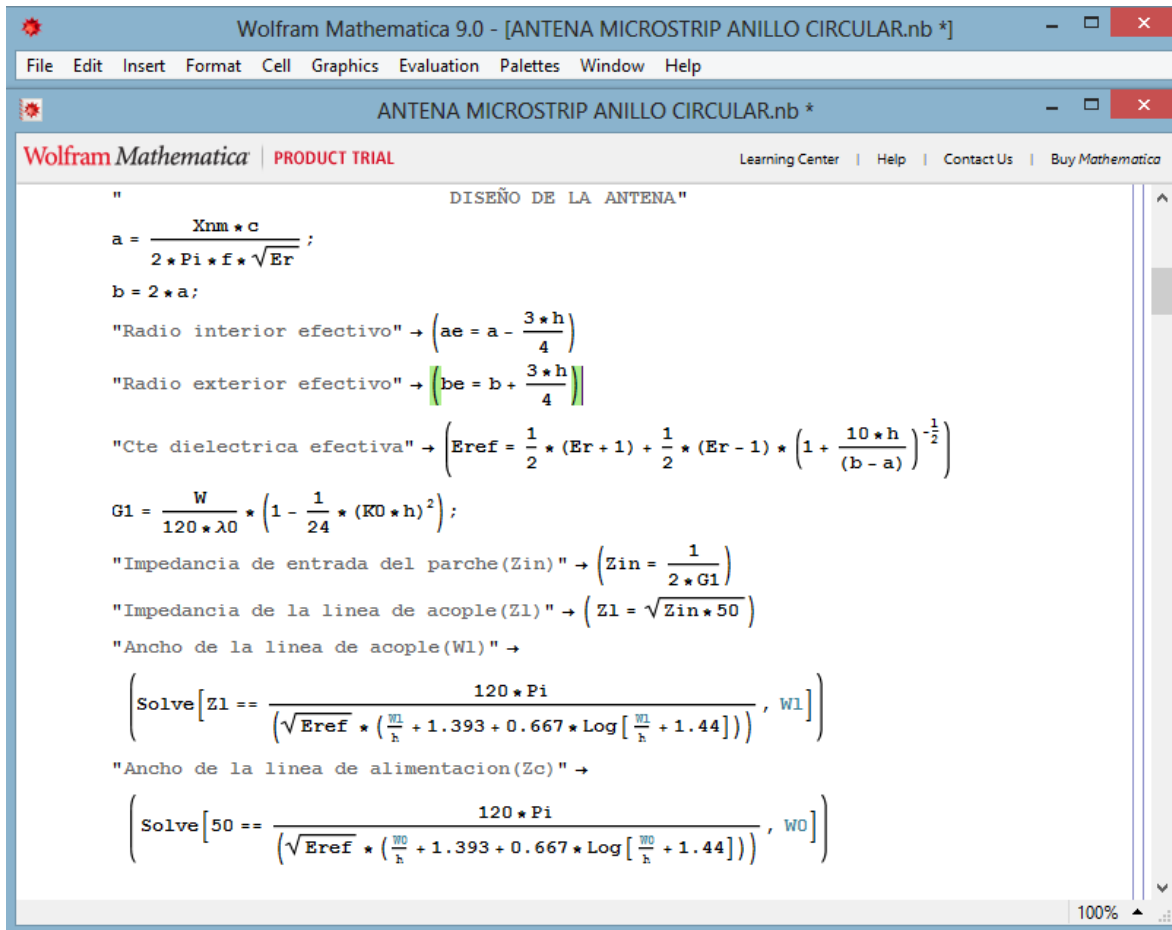
Figura 30. Código propuesto.



Fuente. Wolfram Mathematica.

Con los valores propuestos anteriormente, el software procede a calcular las dimensiones y parámetro de la antena, los radios efectivos exterior e interior, la constante dieléctrica efectiva, y las impedancias para el diseño de la línea de acople.

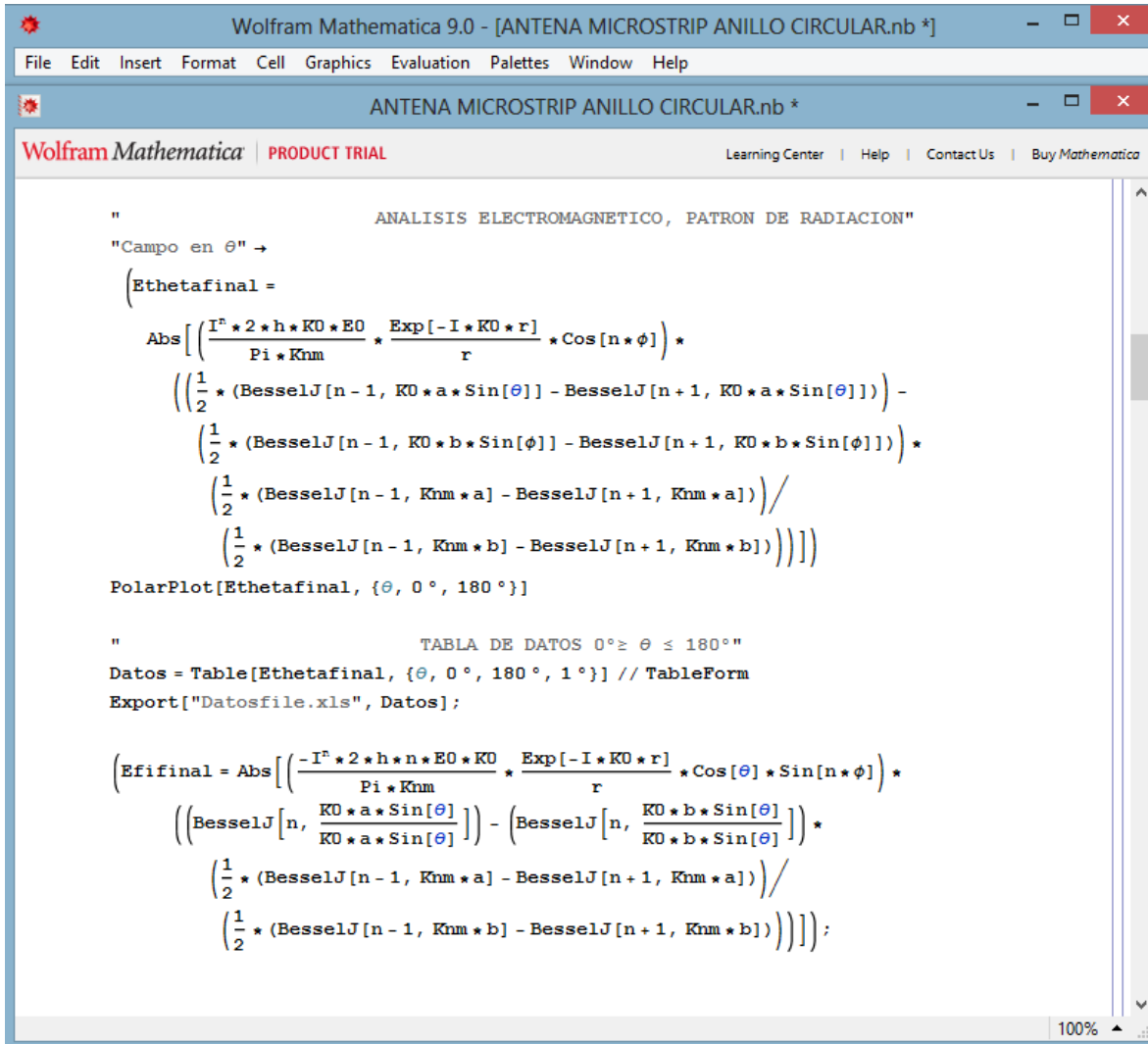
Figura 31. Código propuesto.



Fuente. Wolfram Mathematica.

Ya con las dimensiones de la antena, se procede a calcular el patrón de radiación, en seguida se grafica dicho patrón en coordenadas polares, dándole un valor fijo a  $\varphi$  ( $0^\circ$  o  $90^\circ$ ) y variando la función con respecto a  $\theta$ , se evalúa la función entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$ , pues se desea visualizar únicamente el lóbulo principal por ser el que más información representa. En la figura 32 se observan las ecuaciones para el campo en  $\theta$  y en  $\varphi$ .

Figura 32. Código propuesto.



Fuente. Wolfram Mathematica.

Para relacionar los patrones obtenidos teóricamente y experimentalmente, es necesario exportar los datos del patrón simulado, para esto se utiliza el comando Export, el cual exporta los datos a Excel. Se toman muestras cada grado (1°) y se guardan en una tabla con formato .xls.

#### 5.4. DISEÑO DEL PARCHÉ

Para diseñar la antena anillo circular, se deben utilizar el modelo de cavidades resonantes y calcular las dimensiones del parche, que son el radio interior (a) y el radio exterior (b). El radio interior depende de la frecuencia de resonancia que

para este caso es igual a 10GHz, partiendo de la ecuación 4.11 se halla el valor del radio interior y utilizando la relación entre radios  $a/b=2$  [18] se halla el valor del radio exterior. Luego se utiliza el modelo de línea de transmisión para diseñar el acople de impedancias y la red de alimentación, las ecuaciones utilizadas van desde la 4.18 a la 4.23 y se muestran en la sección 4.1.2, 4.2 y 4.2.1.

#### 5.4.1. DISEÑO ANTENA MICROSTRIP ANILLO CIRCULAR NUMERO 1.

Las dimensiones del parche se obtienen utilizando el simulador diseñado y se muestran de manera organizada para la antena número 1 en la tabla 2.

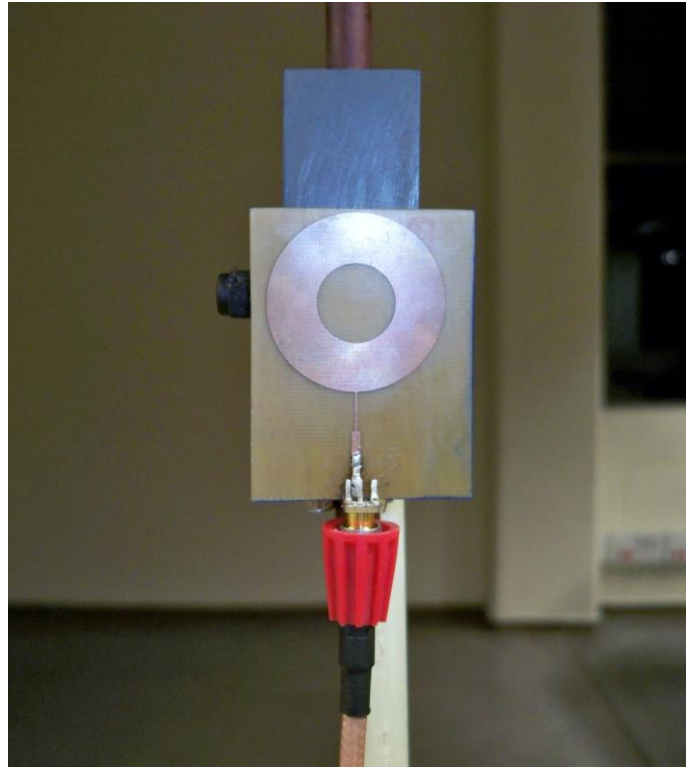
*Tabla 2 Parámetros de la antena número 1.*

PARAMETRO	RESULTADO
Transversal Magnetico (TM)	$TM_{12}$
Radio Interior (a)	7,23639 mm
Radio Exterior (b)	16,2728mm
Constante dieléctrica efectiva ( $\epsilon_{ref}$ )	3,55517
Impedancia de entrada del parche ( $Z_{in}$ )	69,5199 $\Omega$
Impedancia de la línea de acople $\lambda/4$ ( $Z_L$ )	58,9576 $\Omega$
Ancho de la línea de acople $\lambda/4$ ( $W_o$ )	1,05671 mm
Ancho de la línea de alimentación $Z_c=50\Omega$ ( $W_L$ )	1,45441 mm

*Fuente. Autor.*

En la figura 33 se aprecia la antena número 1, la cual se construyó partiendo de los datos obtenidos en la tabla anterior. Con ayuda del software Eagle® (Easily Applicable Graphical Layout Editor) versión 6.1.0. se diseñó el prototipo para su posterior impresión en la lámina del material dieléctrico.

Figura 33. Antena número 1.



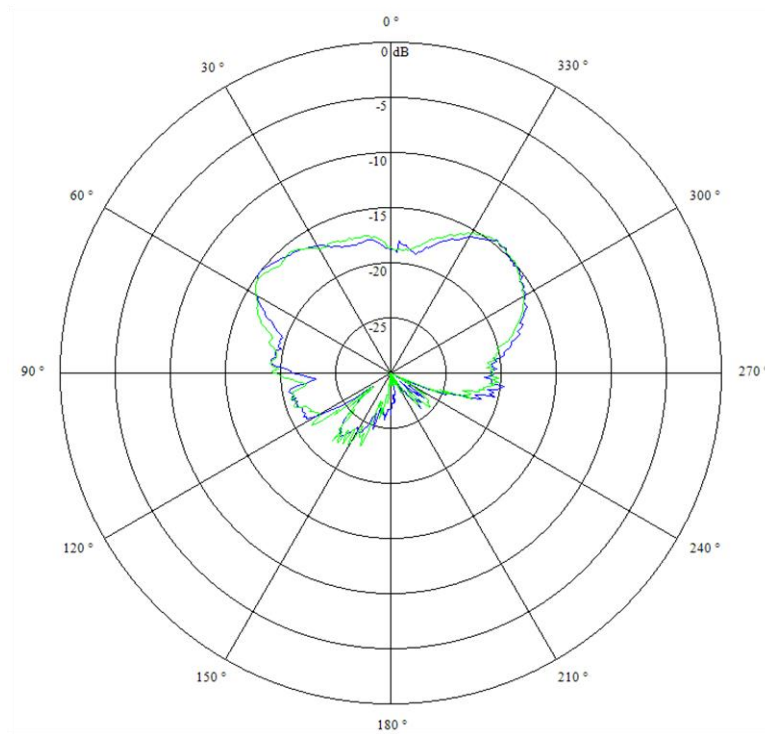
Fuente. Autor.

Con el prototipo de la antena ya construido, se realizó la toma de datos de laboratorio utilizando el módulo Lab-Volt®, Antenna Training and Measuring System (8092) y el software LVDAM-ANT [30].

El equipo del laboratorio consta de un generador RF que incluye dos generadores independientes capaces de entregar una señal RF continua o una señal modulada en amplitud mediante una onda cuadrada de 1 kHz, en las bandas de 915 MHz y 10,5 GHz. Para realizar la transmisión/recepción se utiliza el parche anillo circular y la antena tipo corneta (horn) en la banda de 10,5 GHz.

Posteriormente se utiliza la interfaz para la adquisición de datos (modelo 9507-3) y el software LVDAM-ANT para visualizar las características de la antena en los planos E y H. La figura 34 muestra los campos electromagnéticos para la antena número 1, siendo el color verde el campo magnético y azul el campo eléctrico.

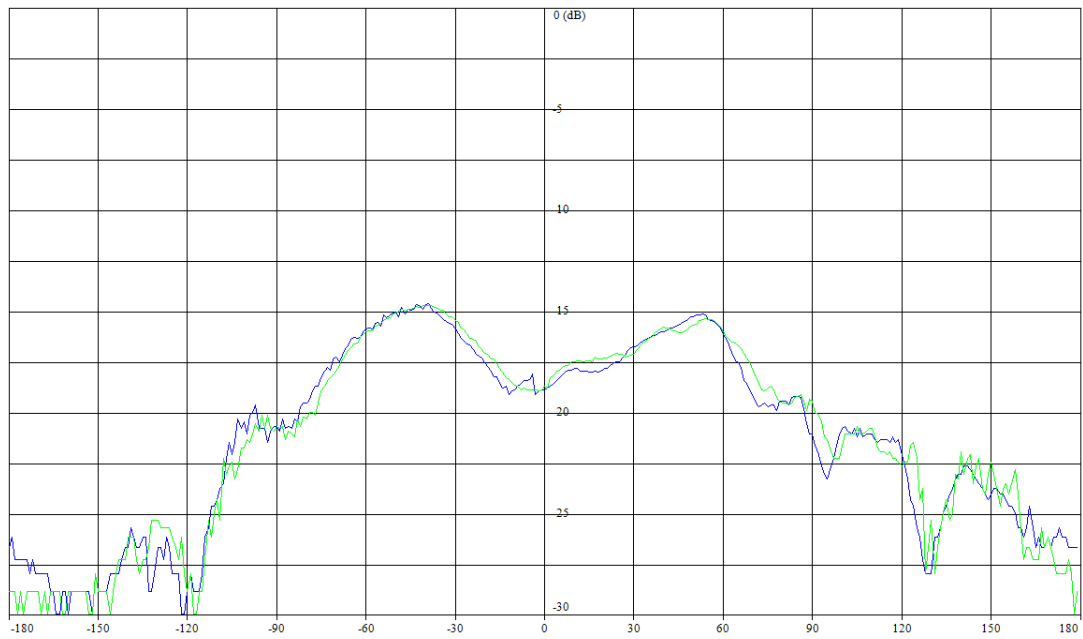
Figura 34. Patrón de radiación Antena número 1.



Fuente. LVDAM-ANT.

En la figura 35 se observa el patrón en coordenadas cartesianas

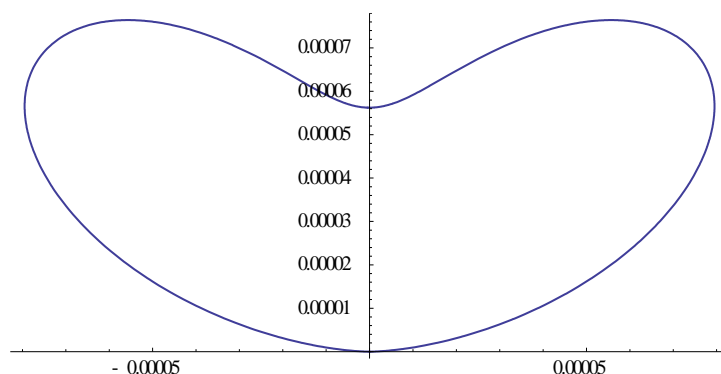
Figura 35. Campo eléctrico y magnético en coordenadas cartesianas.



Fuente. LVDAM-ANT.

## El patrón de radiación simulado en wólfam Mathematica 9

Figura 36. Patrón de radiación simulado Antena número 1.



Fuente. Wolfram Mathematica 9.

Para poder contrastar los valores del campo eléctrico medido por el software LVDAM-ANT y el simulador mathematica 9 se construyó la tabla número 3 donde se visualizan los campos normalizados con su respectivo error en dB y porcentaje.

Al final de la tabla se muestra de manera detallada la datos más importantes a la hora de analizar la antena: el error máximo y mínimo, el promedio y la desviación estándar, además se trabajó con el concepto de potencia mitad.

Tabla 3. Datos medidos por lab-volt y simulados en mathematica 9.

ANGULO	E(LABVOLT)NORMALIZADO	E(MATHEMATICA)NORMALIZADO)	ERROR(dB)	ERROR (%)
1	0,364272	0,096452	5,771146	26,782
2	0,360954	0,146169	3,925971	21,4785
3	0,367482	0,186374	2,948514	18,11083
4	0,367482	0,221398	2,200624	14,6084
5	0,364272	0,252986	1,583297	11,12862
6	0,379412	0,282053	1,287797	9,735862
7	0,387584	0,309155	0,981889	7,842855
8	0,400082	0,334657	0,775492	6,542516
9	0,404761	0,358815	0,52328	4,594595
10	0,411493	0,381817	0,325072	2,967597
11	0,413668	0,403806	0,104795	0,986232
12	0,417923	0,424892	0,071819	0,696865
13	0,422062	0,445165	0,231445	2,310276
14	0,424091	0,464696	0,397101	4,060515
15	0,422062	0,483544	0,590598	6,148209
16	0,428072	0,501759	0,689791	7,368778
17	0,433867	0,519384	0,781317	8,551666



18	0,4413	0,536453	0,847973	9,51525
19	0,446678	0,552997	0,927279	10,63186
20	0,456996	0,569044	0,952334	11,20478
21	0,463588	0,584616	1,00739	12,10285
22	0,469979	0,599735	1,058809	12,9756
23	0,479233	0,61442	1,079185	13,51867
24	0,483725	0,628686	1,138352	14,49608
25	0,491031	0,642548	1,167967	15,15171
26	0,496728	0,656021	1,207988	15,92927
27	0,502305	0,669117	1,24534	16,68113
28	0,513133	0,681846	1,234562	16,87128
29	0,515778	0,694219	1,290341	17,84415
30	0,524857	0,706246	1,289151	18,13893
31	0,534927	0,717936	1,277911	18,3009
32	0,541072	0,729298	1,296502	18,82262
33	0,551873	0,740338	1,275912	18,84654
34	0,558906	0,751065	1,283392	19,21597
35	0,568095	0,761486	1,272415	19,33917
36	0,578199	0,771607	1,253188	19,34081
37	0,586995	0,781435	1,242586	19,44403
38	0,594561	0,790976	1,239675	19,64159
39	0,605176	0,800236	1,213367	19,50606
40	0,609363	0,809221	1,231909	19,98577
41	0,620721	0,817935	1,198225	19,72144
42	0,631866	0,826385	1,165574	19,45191
43	0,639852	0,834576	1,153865	19,47242
44	0,649703	0,842512	1,128612	19,28091
45	0,665196	0,850199	1,065711	18,50033
46	0,677567	0,857642	1,023536	18,00746
47	0,686029	0,864844	1,005952	17,88149
48	0,69812	0,871811	0,964925	17,36914
49	0,709154	0,878548	0,93025	16,93941
50	0,7246	0,885058	0,868732	16,04576
51	0,738071	0,891346	0,819483	15,32753
52	0,747865	0,897417	0,791707	14,95513
53	0,760238	0,903273	0,748694	14,30349
54	0,773394	0,908921	0,701251	13,55264
55	0,789925	0,914362	0,635324	12,44372
56	0,801162	0,919602	0,598797	11,84403
57	0,808911	0,924645	0,580743	11,57341
58	0,819207	0,929493	0,548529	11,02868

59	0,832026	0,934152	0,502804	10,21255
60	0,836288	0,938623	0,501352	10,23347
61	0,849045	0,942912	0,455401	9,386617
62	0,854137	0,94702	0,448318	9,288342
63	0,865151	0,950953	0,410673	8,580222
64	0,871917	0,954712	0,393974	8,279541
65	0,877831	0,958302	0,380914	8,047082
66	0,888802	0,961724	0,342457	7,292264
67	0,891331	0,964983	0,344807	7,365205
68	0,903129	0,968082	0,301624	6,495311
69	0,910707	0,971022	0,278503	6,031482
70	0,923331	0,973806	0,231152	5,047546
71	0,928379	0,976438	0,219194	4,805904
72	0,930061	0,97892	0,222354	4,885826
73	0,935109	0,981253	0,209187	4,614377
74	0,940999	0,983441	0,19159	4,244162
75	0,951097	0,985485	0,154253	3,438815
76	0,954464	0,987388	0,147282	3,292386
77	0,962041	0,989151	0,120688	2,710954
78	0,972993	0,990776	0,078658	1,778298
79	0,979738	0,992265	0,055179	1,252742
80	0,978051	0,993619	0,068586	1,556841
81	0,985642	0,99484	0,040341	0,919807
82	0,981424	0,995929	0,063718	1,450511
83	0,985642	0,996888	0,049269	1,124534
84	0,991551	0,997716	0,026918	0,616475
85	0,995775	0,998415	0,011503	0,264087
86	0,99324	0,998987	0,025053	0,574625
87	0,991551	0,99943	0,034374	0,787912
88	0,989863	0,999747	0,04315	0,988399
89	0,991551	0,999937	0,036574	0,838549
90	1	1	0	0
91	0,999155	0,999937	0,003398	0,078208
92	0,994085	0,999747	0,024666	0,566198
93	0,989018	0,99943	0,045482	1,041196
94	0,98733	0,998987	0,050973	1,165655
95	0,981424	0,998415	0,074545	1,699117
96	0,979738	0,997716	0,078972	1,797844
97	0,971307	0,996888	0,112895	2,558019
98	0,967095	0,995929	0,127596	2,88347
99	0,956989	0,99484	0,168464	3,785118

100	0,951939	0,993619	0,18611	4,168062
101	0,947731	0,992265	0,199428	4,453448
102	0,935951	0,990776	0,247225	5,482534
103	0,930061	0,989151	0,267509	5,908953
104	0,924172	0,987388	0,28735	6,321592
105	0,919965	0,985485	0,29879	6,552054
106	0,914074	0,983441	0,31767	6,936707
107	0,908181	0,981253	0,336086	7,307202
108	0,896389	0,97892	0,382505	8,253063
109	0,88374	0,976438	0,433201	9,269798
110	0,867689	0,973806	0,501086	10,61175
111	0,855833	0,971022	0,548399	11,51886
112	0,849894	0,968082	0,56547	11,81872
113	0,841396	0,964983	0,595193	12,35873
114	0,832879	0,961724	0,624688	12,88456
115	0,816636	0,958302	0,694739	14,16659
116	0,804609	0,954712	0,742876	15,01032
117	0,790792	0,950953	0,800968	16,01609
118	0,777758	0,94702	0,855149	16,92625
119	0,762877	0,942912	0,920162	18,00341
120	0,747865	0,938623	0,986679	19,07578
121	0,738964	0,934152	1,017939	19,51873
122	0,726405	0,929493	1,070677	20,30888
123	0,710068	0,924645	1,146748	21,45765
124	0,701811	0,919602	1,173802	21,77918
125	0,69627	0,914362	1,183408	21,80926
126	0,682278	0,908921	1,245644	22,66423
127	0,670929	0,903273	1,291429	23,23448
128	0,668067	0,897417	1,281738	22,93492
129	0,672831	0,891346	1,221407	21,85157
130	0,650681	0,885058	1,336036	23,4377
131	0,633872	0,878548	1,417639	24,4676
132	0,618672	0,871811	1,48962	25,31393
133	0,614554	0,864844	1,483781	25,02906
134	0,606226	0,857642	1,506715	25,1416
135	0,590252	0,850199	1,584835	25,99476
136	0,588083	0,842512	1,561375	25,44291
137	0,608319	0,834576	1,373344	22,62568
138	0,585905	0,826385	1,493557	24,04808
139	0,565816	0,817935	1,600434	25,21189
140	0,523576	0,809221	1,890872	28,56446

141	0,507771	0,800236	1,975508	29,24658
142	0,506414	0,790976	1,936577	28,45623
143	0,491031	0,781435	2,01784	29,04043
144	0,47619	0,771607	2,096163	29,54177
145	0,471548	0,761486	2,081362	28,99383
146	0,469979	0,751065	2,035992	28,10863
147	0,456996	0,740338	2,095181	28,33427
148	0,44311	0,729298	2,163929	28,61874
149	0,439471	0,717936	2,131555	27,84651
150	0,426093	0,706246	2,194514	28,01529
151	0,428072	0,694219	2,099801	26,61474
152	0,426093	0,681846	2,041813	25,57523
153	0,417923	0,669117	2,044051	25,11932
154	0,409285	0,656021	2,048924	24,67365
155	0,400082	0,642548	2,057564	24,2466
156	0,392734	0,628686	2,043346	23,59513
157	0,384924	0,61442	2,030905	22,94959
158	0,387584	0,599735	1,895938	21,21512
159	0,392734	0,584616	1,727718	19,18817
160	0,387584	0,569044	1,667797	18,14595
161	0,390186	0,552997	1,514505	16,28105
162	0,376552	0,536453	1,537066	15,99008
163	0,373614	0,519384	1,430649	14,57695
164	0,373614	0,501759	1,280722	12,81453
165	0,357516	0,483544	1,3114	12,60276
166	0,360954	0,464696	1,097172	10,3742
167	0,364272	0,445165	0,87095	8,089278
168	0,33347	0,424892	1,052218	9,142199
169	0,350231	0,403806	0,618178	5,35746
170	0,311801	0,381817	0,879771	7,001551
171	0,328651	0,358815	0,381355	3,016393
172	0,337101	0,334657	0,031594	0,244342
173	0,317905	0,309155	0,121203	0,874942
174	0,316654	0,282053	0,502535	3,460048
175	0,308401	0,252986	0,860192	5,541491
176	0,308401	0,221398	1,439415	8,700258
177	0,308401	0,186374	2,187306	12,20269
178	0,309949	0,146169	3,264354	16,378
179	0,308401	0,096452	5,048041	21,19487

<b>ERROR MIN(dB)</b>	<b>ERROR MIN (%)</b>
<b>0</b>	<b>0</b>
<b>ERROR MAX(dB)</b>	<b>ERROR MAX (%)</b>
<b>5,048041442</b>	<b>29,54176676</b>
<b>PROMEDIO ERROR(dB)</b>	<b>PROMEDIO POTENCIA MITAD</b>
<b>0,963126206</b>	<b>-0,475748415</b>
<b>DESVIACION ESTANDAR(dB)</b>	<b>DESVIACION ESTANDAR POTENCIA MITAD</b>
<b>0,77475738</b>	<b>0,398669456</b>
	<b>PROMEDIO ERROR POTENCIA MITAD (%)</b>
	<b>6,9873034</b>

*Fuente. Excel.*

En esta antena los resultados no fueron los esperados debido a que el patrón de radiación está muy atenuado, además el lóbulo principal no es simétrico.

Después de revisar los datos obtenidos, se decidió cambiar el modo de operación transversal magnético  $TM_{21}$ , lo cual disminuyó drásticamente las dimensiones de la antena y cambio las características del patrón de radiación.

#### 5.4.2. DISEÑO ANTENA MICROSTRIP ANILLO CIRCULAR NUMERO 2.

Utilizando el simulador se diseñaron los parámetros de la nueva antena y se etiqueto como antena número 2. En la tabla número 4 se muestran los resultados

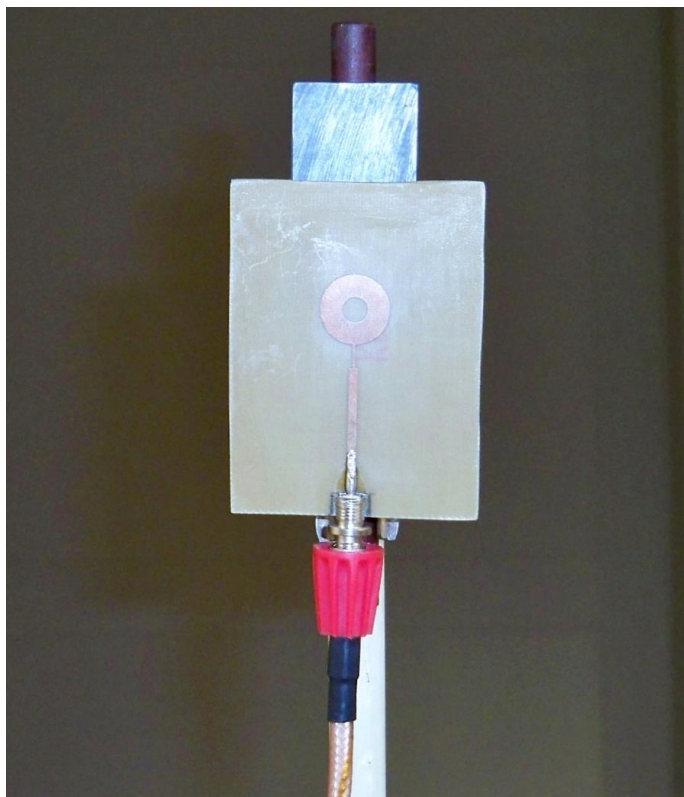
*Tabla 4. Parámetros de la antena número 2.*

<b>PARAMETRO</b>	<b>RESULTADO</b>
Transversal Magnetico (TM)	$TM_{21}$
Radio Interior (a)	2,60045 mm
Radio Exterior (b)	7,00089mm
Constante dieléctrica efectiva ( $\epsilon_{ref}$ )	3,30182
Impedancia de entrada del parche ( $Z_{in}$ )	138,998 $\Omega$
Impedancia de la línea de acople $\lambda/4$ ( $Z_L$ )	83,3662 $\Omega$
Ancho de la línea de acople $\lambda/4$ ( $W_o$ )	0,492138 mm
Ancho de la línea de alimentación $Z_c=50\Omega$ ( $W_L$ )	1,55472 mm

*Fuente. Autor.*

En la figura 37 se aprecia la antena número 2, la cual se construyó partiendo de los datos obtenidos en la tabla anterior. Para su construcción se utilizó el mismo procedimiento realizado para la antena número 1.

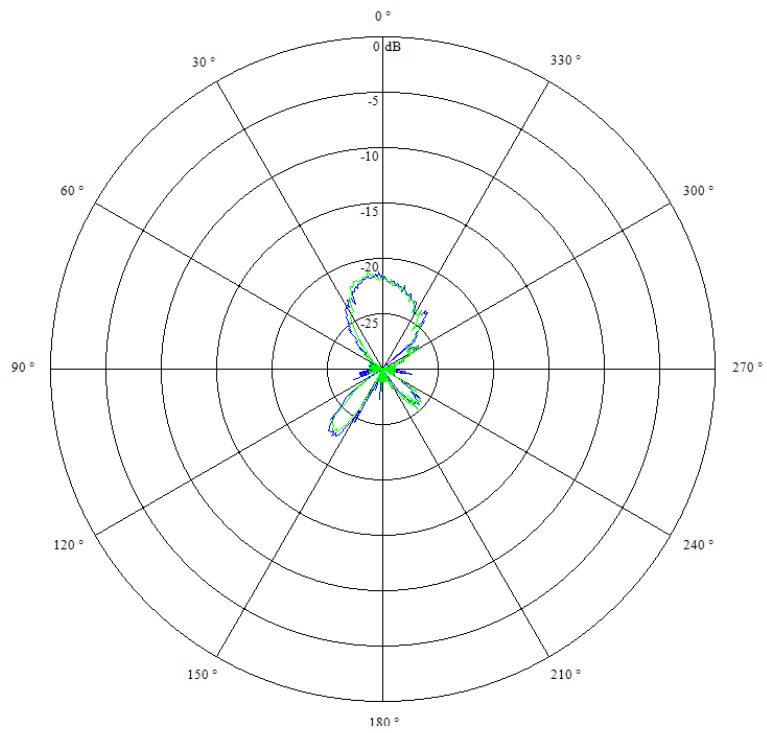
*Figura 37. Antena número 2.*



*Fuente. Autor.*

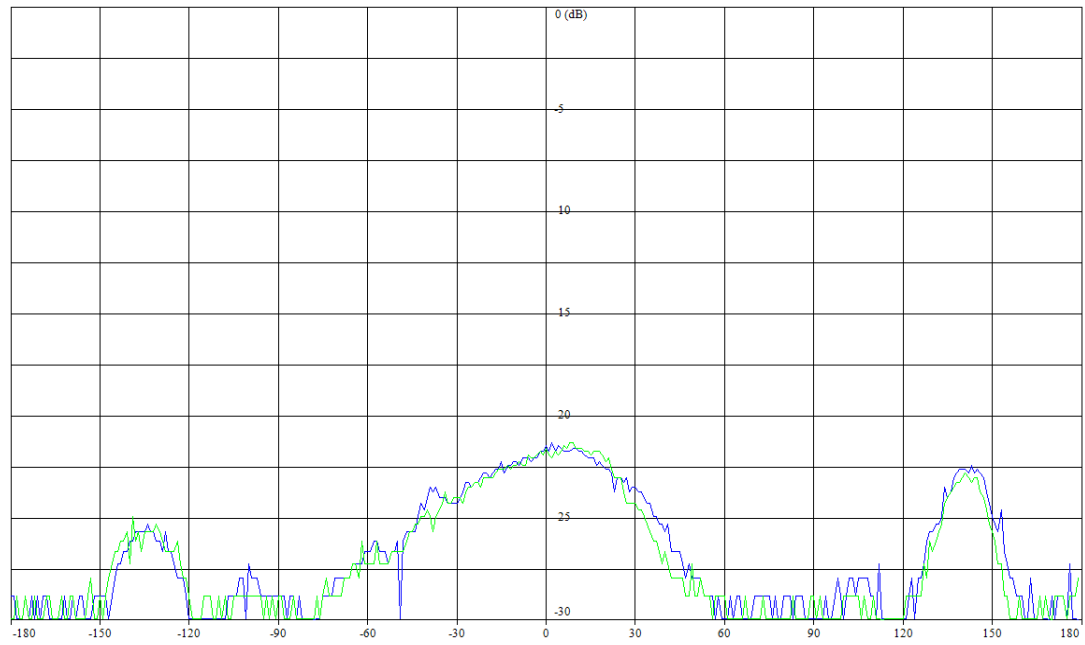
En las figuras 38 y 39 se observa el patrón de radiación tomado en el LVDAM-ANT en coordenadas polares y cartesianas respectivamente.

Figura 38. Patrón de radiación antena número 2.



Fuente. LVDAM-ANT.

Figura 39. Campo eléctrico y magnético en coordenadas cartesianas.

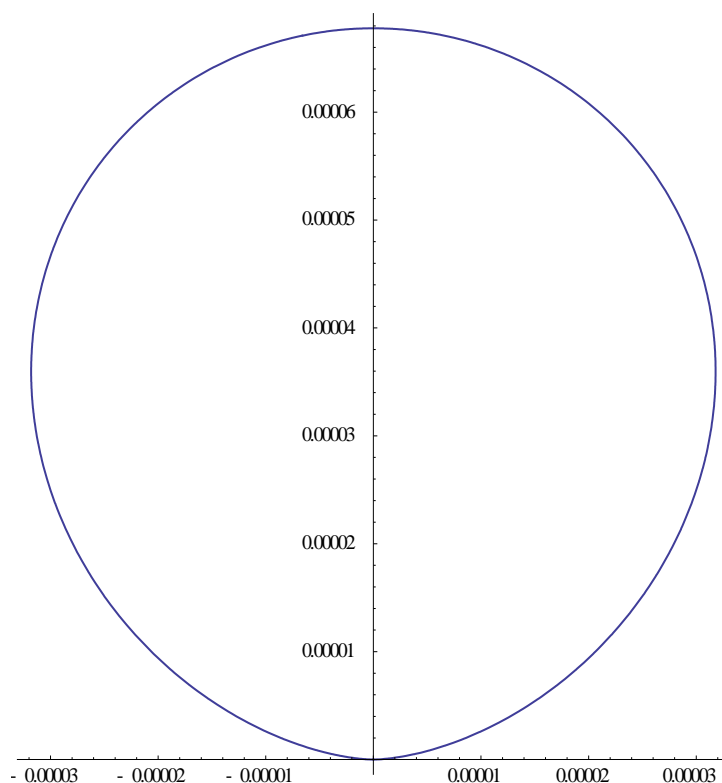


Fuente. LVDAM-ANT.

El patrón de radiación simulado en wólffram Mathematica 9



Figura 40. Patrón de radiación simulado antena número 2.



Fuente. Wolfram Mathematica 9.

En la tabla número 5 se visualizan los campos normalizados con su respectivo error en dB y porcentaje, además se muestra de manera detallada los datos más importantes a la hora de analizar la antena

Tabla 5. Datos medidos por lab-volt y simulados en mathematica 9.

ANGULO	E(LABVOLT)NORMALIZADO	E(MATHEMATICA)NORMALIZADO	ERROR(dB)	ERROR (%)
1	0,71130383	0,006453551	20,42256	70,48503
2	0,739213004	0,015884311	16,67801	72,33287
3	0,739213004	0,02689087	14,39165	71,23221
4	0,71130383	0,039050839	12,60425	67,22530
5	0,739213004	0,052132199	11,51664	68,70808
6	0,71130383	0,06598148	10,32633	64,53223
7	0,71130383	0,080486176	9,46334	63,08177
8	0,71130383	0,09555812	8,71788	61,57457
9	0,71130383	0,111124904	8,06244	60,01789
10	0,709854667	0,127124964	7,46939	58,27297
11	0,71130383	0,143504566	6,95189	56,77993
12	0,71130383	0,16021584	6,47350	55,10880

13	0,739213004	0,177215458	6,20268	56,19975
14	0,739213004	0,194463703	5,79931	54,47493
15	0,739213004	0,211923803	5,42590	52,72892
16	0,739213004	0,229561444	5,07871	50,96516
17	0,762107282	0,247344407	4,88714	51,47629
18	0,762107282	0,265242288	4,58373	49,68650
19	0,762107282	0,283226292	4,29883	47,88810
20	0,762107282	0,301269066	4,03062	46,08382
21	0,762107282	0,319344574	3,77757	44,27627
22	0,762107282	0,337428	3,53835	42,46793
23	0,781753873	0,355495663	3,42236	42,62582
24	0,781753873	0,373524961	3,20750	40,82289
25	0,781753873	0,391494318	3,00345	39,02596
26	0,781753873	0,409383146	2,80940	37,23707
27	0,799109017	0,427171808	2,72003	37,19372
28	0,799109017	0,444841597	2,54401	35,42674
29	0,799109017	0,462374711	2,37612	33,67343
30	0,814751163	0,479754232	2,30006	33,49969
31	0,814751163	0,496964114	2,14700	31,77870
32	0,799109017	0,513989163	1,91652	28,51199
33	0,799109017	0,530815027	1,77663	26,82940
34	0,799109017	0,547428183	1,64279	25,16808
35	0,781753873	0,563815921	1,41933	21,79380
36	0,799109017	0,579966335	1,39203	21,91427
37	0,799109017	0,595868307	1,27456	20,32407
38	0,814751163	0,611511497	1,24620	20,32397
39	0,71130383	0,626886324	0,54866	8,44175
40	0,814751163	0,641983956	1,03501	17,27672
41	0,829058332	0,656796294	1,01154	17,22620
42	0,829058332	0,67131595	0,91658	15,77424
43	0,829058332	0,685536238	0,82555	14,35221
44	0,829058332	0,69945115	0,73828	12,96072
45	0,854642845	0,713055338	0,78661	14,15875
46	0,877225127	0,726344097	0,81969	15,08810
47	0,866250754	0,739313338	0,68815	12,69374
48	0,887651573	0,751959572	0,72048	13,56920
49	0,907123485	0,764279885	0,74414	14,28436
50	0,89759921	0,776271915	0,63069	12,13273
51	0,907123485	0,787933828	0,61177	11,91897
52	0,887651573	0,799264293	0,45552	8,83873
53	0,887651573	0,810262457	0,39617	7,73891

54	0,887651573	0,820927919	0,33938	6,67237
55	0,877225127	0,831260705	0,23374	4,59644
56	0,877225127	0,841261242	0,18180	3,59639
57	0,877225127	0,850930326	0,13217	2,62948
58	0,877225127	0,860269105	0,08477	1,69560
59	0,887651573	0,869279041	0,09083	1,83725
60	0,89759921	0,87796189	0,09607	1,96373
61	0,916270969	0,886319674	0,14434	2,99513
62	0,916270969	0,894354653	0,10514	2,19163
63	0,907123485	0,902069297	0,02427	0,50542
64	0,916270969	0,909466261	0,03237	0,68047
65	0,916270969	0,91654836	0,00131	0,02774
66	0,925080103	0,923318543	0,00828	0,17616
67	0,933584444	0,929779863	0,01773	0,38046
68	0,933584444	0,935935461	0,01092	0,23510
69	0,925080103	0,941788532	0,07774	1,67084
70	0,933584444	0,947342309	0,06353	1,37579
71	0,94181155	0,952600038	0,04947	1,07885
72	0,94181155	0,957564953	0,07204	1,57534
73	0,957527437	0,962240259	0,02132	0,47128
74	0,933584444	0,966629109	0,15106	3,30447
75	0,949785742	0,970734584	0,09475	2,09488
76	0,949785742	0,974559675	0,11183	2,47739
77	0,957527437	0,978107269	0,09235	2,05798
78	0,957527437	0,981380124	0,10686	2,38527
79	0,949785742	0,984380861	0,15538	3,45951
80	0,965056007	0,987111945	0,09814	2,20559
81	0,965056007	0,989575674	0,10896	2,45197
82	0,965056007	0,991774165	0,11860	2,67182
83	0,957527437	0,993709343	0,16108	3,61819
84	0,965056007	0,99538293	0,13438	3,03269
85	0,965056007	0,996796437	0,14054	3,17404
86	0,979534575	0,997951157	0,08090	1,84166
87	0,979534575	0,998848157	0,08480	1,93136
88	0,993330264	0,99948827	0,02684	0,61580
89	0,979534575	0,999872098	0,08925	2,03375
90	1	1	0,00000	0,00000
91	0,979534575	0,999872098	0,08925	2,03375
92	0,993330264	0,99948827	0,02684	0,61580
93	0,986512128	0,998848157	0,05397	1,23360
94	0,979534575	0,997951157	0,08090	1,84166

95	0,979534575	0,996796437	0,07587	1,72619
96	0,979534575	0,99538293	0,06970	1,58484
97	0,986512128	0,993709343	0,03157	0,71972
98	0,986512128	0,991774165	0,02310	0,52620
99	0,979534575	0,989575674	0,04429	1,00411
100	0,979534575	0,987111945	0,03347	0,75774
101	0,972386781	0,984380861	0,05324	1,19941
102	0,965056007	0,981380124	0,07285	1,63241
103	0,965056007	0,978107269	0,05834	1,30513
104	0,965056007	0,974559675	0,04256	0,95037
105	0,949785742	0,970734584	0,09475	2,09488
106	0,957527437	0,966629109	0,04109	0,91017
107	0,949785742	0,962240259	0,05658	1,24545
108	0,94181155	0,957564953	0,07204	1,57534
109	0,94181155	0,952600038	0,04947	1,07885
110	0,933584444	0,947342309	0,06353	1,37579
111	0,89759921	0,941788532	0,20871	4,41893
112	0,925080103	0,935935461	0,05067	1,08554
113	0,925080103	0,929779863	0,02201	0,46998
114	0,916270969	0,923318543	0,03328	0,70476
115	0,925080103	0,91654836	0,04024	0,85317
116	0,89759921	0,909466261	0,05704	1,18671
117	0,907123485	0,902069297	0,02427	0,50542
118	0,907123485	0,894354653	0,06157	1,27688
119	0,89759921	0,886319674	0,05492	1,12795
120	0,89759921	0,87796189	0,09607	1,96373
121	0,887651573	0,869279041	0,09083	1,83725
122	0,877225127	0,860269105	0,08477	1,69560
123	0,877225127	0,850930326	0,13217	2,62948
124	0,854642845	0,841261242	0,06854	1,33816
125	0,854642845	0,831260705	0,12047	2,33821
126	0,842292533	0,820927919	0,11158	2,13646
127	0,842292533	0,810262457	0,16837	3,20301
128	0,829058332	0,799264293	0,15895	2,97940
129	0,842292533	0,787933828	0,28973	5,43587
130	0,799109017	0,776271915	0,12592	2,28371
131	0,799109017	0,764279885	0,19354	3,48291
132	0,799109017	0,751959572	0,26412	4,71494
133	0,799109017	0,739313338	0,33777	5,97957
134	0,781753873	0,726344097	0,31928	5,54098
135	0,762107282	0,713055338	0,28893	4,90519

136	0,781753873	0,69945115	0,48313	8,23027
137	0,762107282	0,685536238	0,45986	7,65710
138	0,762107282	0,67131595	0,55089	9,07913
139	0,762107282	0,656796294	0,64585	10,53110
140	0,762107282	0,641983956	0,74492	12,01233
141	0,739213004	0,626886324	0,71581	11,23267
142	0,739213004	0,611511497	0,82365	12,77015
143	0,739213004	0,595868307	0,93619	14,33447
144	0,739213004	0,579966335	1,05367	15,92467
145	0,71130383	0,563815921	1,00918	14,74879
146	0,739213004	0,547428183	1,30442	19,17848
147	0,71130383	0,530815027	1,27112	18,04888
148	0,71130383	0,513989163	1,41101	19,73147
149	0,71130383	0,496964114	1,55730	21,43397
150	0,739213004	0,479754232	1,87751	25,94588
151	0,71130383	0,462374711	1,87061	24,89291
152	0,739213004	0,444841597	2,20564	29,43714
153	0,739213004	0,427171808	2,38167	31,20412
154	0,71130383	0,409383146	2,39925	30,19207
155	0,71130383	0,391494318	2,59330	31,98095
156	0,71130383	0,373524961	2,79736	33,77789
157	0,71130383	0,355495663	3,01221	35,58082
158	0,739213004	0,337428	3,40588	40,17850
159	0,739213004	0,319344574	3,64510	41,98684
160	0,739213004	0,301269066	3,89815	43,79439
161	0,739213004	0,283226292	4,16636	45,59867
162	0,739213004	0,265242288	4,45127	47,39707
163	0,739213004	0,247344407	4,75468	49,18686
164	0,71130383	0,229561444	4,91156	48,17424
165	0,739213004	0,211923803	5,42590	52,72892
166	0,71130383	0,194463703	5,63217	51,68401
167	0,71130383	0,177215458	6,03554	53,40884
168	0,739213004	0,16021584	6,64064	57,89972
169	0,739213004	0,143504566	7,11904	59,57084
170	0,739213004	0,127124964	7,64539	61,20880
171	0,71130383	0,111124904	8,06244	60,01789
172	0,739213004	0,09555812	8,88502	64,36549
173	0,739213004	0,080486176	9,63048	65,87268
174	0,739213004	0,06598148	10,49348	67,32315
175	0,71130383	0,052132199	11,34949	65,91716
176	0,71130383	0,039050839	12,60425	67,22530

177	0,71130383	0,02689087	14,22450	68,44130
178	0,735883351	0,015884311	16,65841	71,99990
179	0,735883351	0,006453551	20,57010	72,94298

<b>ERROR MIN(dB)</b>	<b>ERROR MIN (%)</b>
<b>0</b>	<b>0</b>
<b>ERROR MAX(dB)</b>	<b>ERROR MAX (%)</b>
<b>20,57010242</b>	<b>72,9429801</b>
<b>PROMEDIO ERROR(dB)</b>	<b>PROMEDIO POTENCIA MITAD</b>
<b>2,397749394</b>	<b>-0,27028703</b>
<b>DESVIACION ESTANDAR(dB)</b>	<b>DESVIACION ESTANDAR POTENCIA MITAD</b>
<b>3,786634055</b>	<b>0,16283083</b>
	<b>PROMEDIO ERROR POTENCIA MITAD %</b>
	<b>1,65516358</b>

*Fuente. Excel.*

Esta antena presentó mejor simetría en el lóbulo principal, sin embargo aparecen unos lóbulos secundarios no deseados, además el patrón de radiación tiene muy poca ganancia y se ve muy afectado por ruidos externos.

### 5.4.3. DISEÑO ANTENA MICROSTRIP ANILLO CIRCULAR NUMERO 3.

Para esta antena se optó por disminuir aún más el tamaño, cambiando el modo de operación transversal magnético al  $TM_{11}$ . En el simulador se diseñaron los parámetros de la antena número 3. En la tabla número 6 se muestran los resultados

*Tabla 6. Parámetros de la antena número 3.*

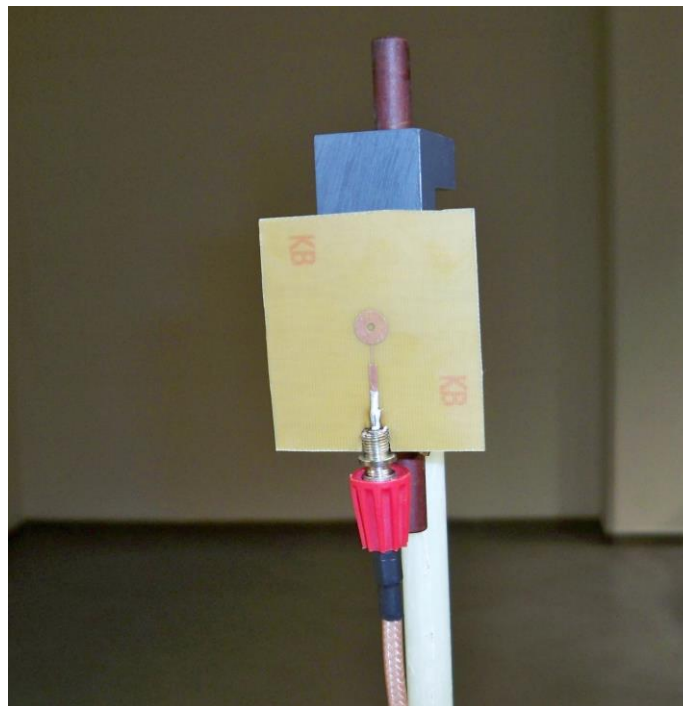
<b>PARAMETRO</b>	<b>RESULTADO</b>
Transversal Magnetico (TM)	$TM_{11}$
Radio Interior (a)	1,01693 mm
Radio Exterior (b)	3,83387 mm
Constante dieléctrica efectiva ( $\epsilon_{ref}$ )	3,11506

Impedancia de entrada del parche ( $Z_{in}$ )	213,04 $\Omega$
Impedancia de la línea de acople $\lambda/4$ ( $Z_L$ )	103,209 $\Omega$
Ancho de la línea de acople $\lambda/4$ ( $W_o$ )	0,244129 mm
Ancho de la línea de alimentación $Z_c=50\Omega$ ( $W_L$ )	1,63683 mm

*Fuente. Autor.*

Con los anteriores datos, se construyó la antena número 3

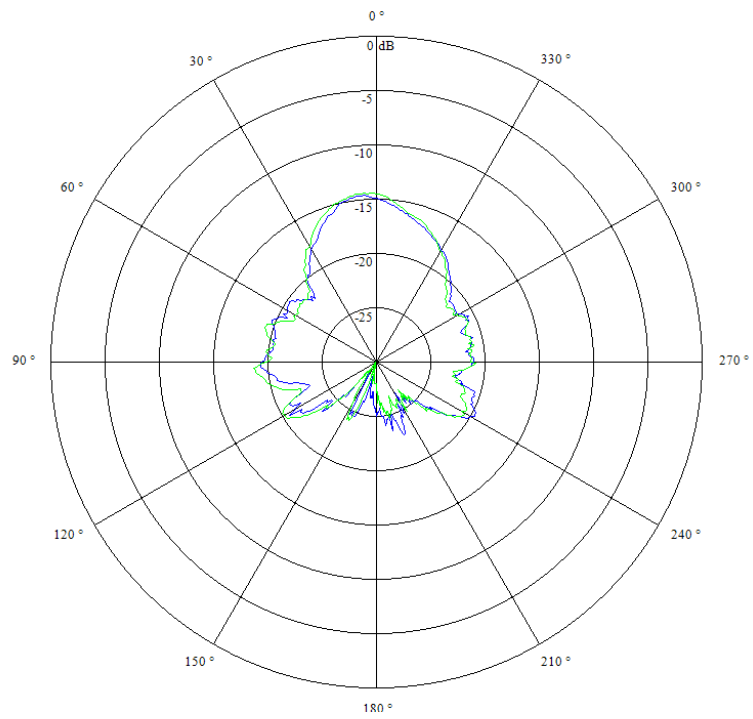
*Figura 41. Antena número 3.*



*Fuente. Autor.*

Los datos obtenidos mediante el LVDAM-ANT se muestran en las figuras 42 y 43.

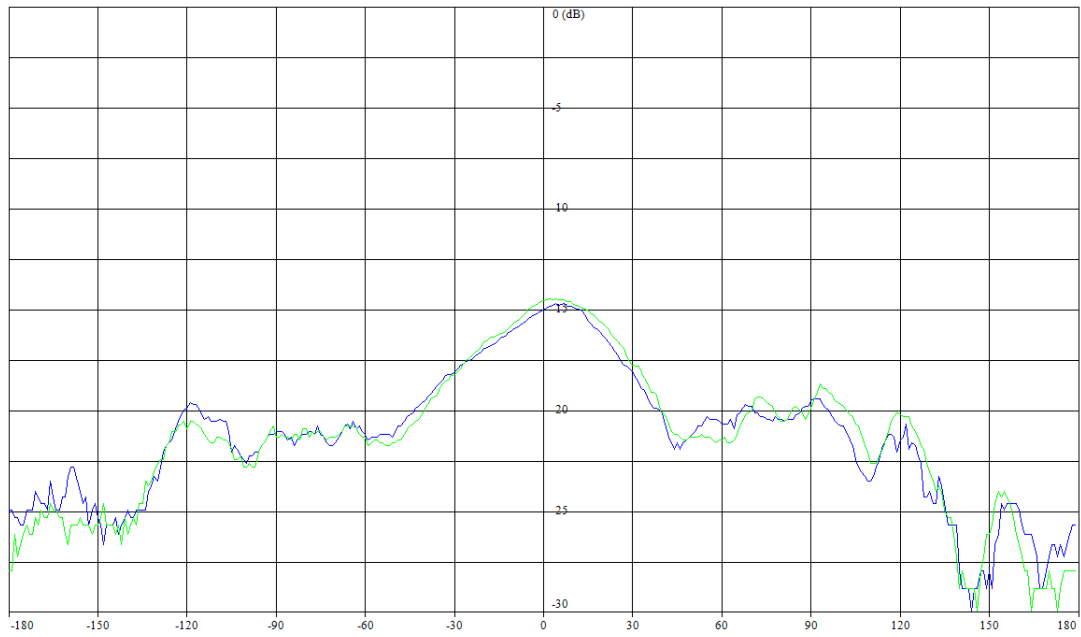
Figura 42. Patrón de radiación antena número 3.



Fuente. LVDAM-ANT.



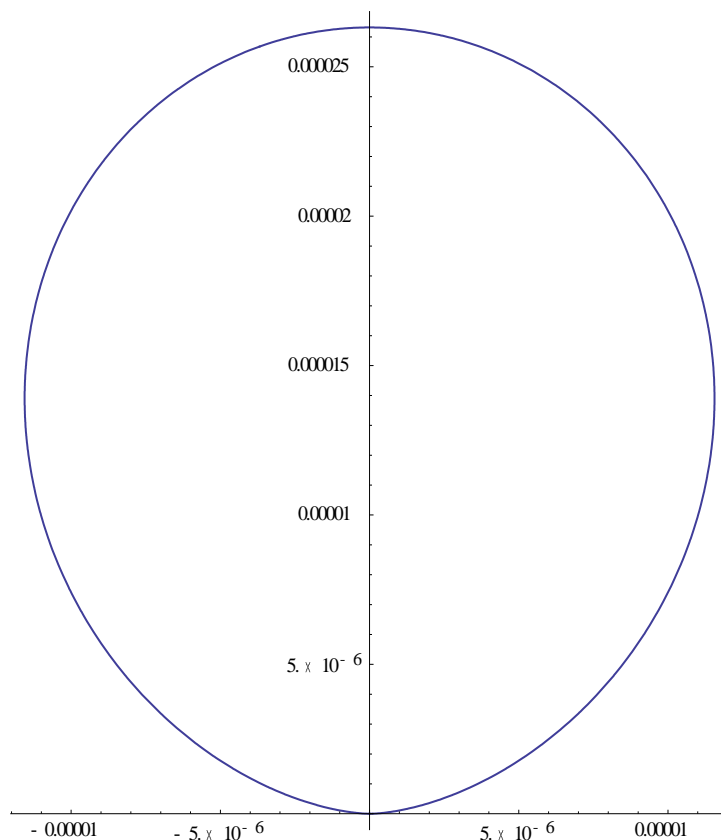
Figura 43. Campo eléctrico y magnético en coordenadas cartesianas.



Fuente. LVDAM-ANT.

El patrón de radiación simulado en wólfam Mathematica 9

Figura 44. Patrón de radiación antena número 3.



Fuente. Wolfram Mathematica 9.

La tabla número 7 recopila de manera detallada los datos teóricos y experimentales tomados en las pruebas hechas a esta antena

Tabla 7. Datos medidos por lab-volt y simulados en mathematica 9.

ANGULO	E(LABVOLT)NORMALIZADO	E(MATHEMATICA)NORMALIZADO	ERROR(dB)	ERROR (%)
1	0,6882113	0,00545263	21,01116	68,27587
2	0,67412676	0,01342266	17,00903	66,07041
3	0,68362111	0,02272901	14,78235	66,08921
4	0,6882113	0,03301821	13,18968	65,51931
5	0,69270537	0,04409795	11,96130	64,86074
6	0,69270537	0,05584256	10,93583	63,68628
7	0,69710895	0,06816115	10,09764	62,89478
8	0,69710895	0,08098353	9,34904	61,61254
9	0,69270537	0,09425292	8,66254	59,84524
10	0,70566568	0,10792176	8,15490	59,77439
11	0,69270537	0,12194913	7,54370	57,07562
12	0,6882113	0,13629904	7,03229	55,19123

13	0,67892879	0,15093934	6,53022	52,79895
14	0,67412676	0,16584082	6,09050	50,82859
15	0,67412676	0,18097669	5,71119	49,31501
16	0,67892879	0,19632211	5,38855	48,26067
17	0,6882113	0,21185389	5,11685	47,63574
18	0,69710895	0,22755019	4,86223	46,95588
19	0,70566568	0,24339035	4,62296	46,22753
20	0,70982781	0,25935472	4,37259	45,04731
21	0,70142751	0,27542455	4,05980	42,60030
22	0,71391794	0,29158187	3,88888	42,23361
23	0,70142751	0,30780942	3,57701	39,36181
24	0,70566568	0,32409057	3,37933	38,15751
25	0,69710895	0,34040928	3,11299	35,66997
26	0,69270537	0,35675005	2,88185	33,59553
27	0,68362111	0,37309787	2,62993	31,05232
28	0,6882113	0,38943819	2,47283	29,87731
29	0,6882113	0,40575692	2,29456	28,24544
30	0,6882113	0,42204037	2,12368	26,61709
31	0,69270537	0,43827525	1,98802	25,44301
32	0,69270537	0,45444866	1,83064	23,82567
33	0,69270537	0,47054805	1,67945	22,21573
34	0,69270537	0,48656125	1,53411	20,61441
35	0,6882113	0,50247643	1,36606	18,57349
36	0,69710895	0,51828207	1,28734	17,88269
37	0,70566568	0,53396702	1,21085	17,16987
38	0,70566568	0,54952042	1,08615	15,61453
39	0,71391794	0,56493173	1,01652	14,89862
40	0,72189688	0,58019075	0,94904	14,17061
41	0,72579183	0,59528755	0,86085	13,05043
42	0,72962805	0,61021251	0,77620	11,94155
43	0,73713377	0,62495631	0,71697	11,21775
44	0,74080832	0,63950992	0,63859	10,12984
45	0,74801142	0,65386461	0,58420	9,41468
46	0,75154415	0,6680119	0,51170	8,35322
47	0,75848057	0,68194363	0,46196	7,65369
48	0,76525521	0,69565188	0,41414	6,96033
49	0,77188032	0,70912903	0,36825	6,27513
50	0,7815588	0,7223677	0,34203	5,91911
51	0,78785165	0,73536079	0,29944	5,24909
52	0,79402677	0,74810147	0,25875	4,59253
53	0,80308282	0,76058313	0,23614	4,24997

54	0,80604959	0,77279945	0,18295	3,32501
55	0,80604959	0,78474433	0,11634	2,13053
56	0,81190949	0,79641191	0,08370	1,54976
57	0,81767635	0,80779659	0,05279	0,98798
58	0,82616252	0,81889299	0,03838	0,72695
59	0,82894987	0,82969595	0,00391	0,07461
60	0,83446496	0,84020055	0,02975	0,57356
61	0,83719392	0,85040207	0,06798	1,32082
62	0,84259673	0,86029603	0,09028	1,76993
63	0,84792891	0,86987812	0,11099	2,19492
64	0,85319438	0,87914428	0,13012	2,59499
65	0,85839491	0,88809061	0,14770	2,96957
66	0,86608147	0,89671343	0,15095	3,06320
67	0,86861462	0,90500924	0,17826	3,63946
68	0,87363866	0,91297472	0,19127	3,93361
69	0,87613037	0,92060675	0,21505	4,44764
70	0,88107403	0,92790237	0,22490	4,68283
71	0,88839412	0,9348588	0,22140	4,64647
72	0,89560639	0,94147341	0,21691	4,58670
73	0,90035736	0,94774375	0,22276	4,73864
74	0,90972913	0,95366752	0,20485	4,39384
75	0,9120463	0,95924259	0,21912	4,71963
76	0,92121589	0,96446696	0,19926	4,32511
77	0,92348436	0,96933878	0,21046	4,58544
78	0,93023566	0,97385636	0,19902	4,36207
79	0,93690848	0,97801814	0,18650	4,11097
80	0,94350579	0,98182268	0,17288	3,83169
81	0,95003099	0,98526871	0,15817	3,52377
82	0,95648786	0,98835506	0,14234	3,18672
83	0,96075597	0,9910807	0,13496	3,03247
84	0,9671059	0,99344473	0,11670	2,63388
85	0,9733942	0,99544637	0,09729	2,20522
86	0,97755399	0,99708497	0,08591	1,95310
87	0,98168833	0,99835999	0,07314	1,66717
88	0,98784463	0,99927101	0,04995	1,14264
89	0,99191895	0,99981774	0,03445	0,78988
90	1	1	0,00000	0,00000
91	0,99394784	0,99981774	0,02557	0,58699
92	0,99597083	0,99927101	0,01437	0,33002
93	0,9979878	0,99835999	0,00162	0,03722
94	0,98988495	0,99708497	0,03147	0,72000

95	0,98988495	0,99544637	0,02433	0,55614
96	0,98579878	0,99344473	0,03355	0,76460
97	0,97962466	0,9910807	0,05049	1,14560
98	0,97962466	0,98835506	0,03853	0,87304
99	0,9733942	0,98526871	0,05266	1,18745
100	0,95862563	0,98182268	0,10384	2,31971
101	0,94350579	0,97801814	0,15602	3,45123
102	0,93246813	0,97385636	0,18861	4,13882
103	0,92348436	0,96933878	0,21046	4,58544
104	0,92121589	0,96446696	0,19926	4,32511
105	0,9120463	0,95924259	0,21912	4,71963
106	0,90035736	0,95366752	0,24982	5,33102
107	0,89080999	0,94774375	0,26906	5,69338
108	0,88107403	0,94147341	0,28796	6,03994
109	0,87113363	0,9348588	0,30661	6,37252
110	0,86097224	0,92790237	0,32513	6,69301
111	0,84792891	0,92060675	0,35715	7,26778
112	0,83446496	0,91297472	0,39051	7,85098
113	0,82616252	0,90500924	0,39588	7,88467
114	0,82335499	0,89671343	0,37067	7,33584
115	0,81767635	0,88809061	0,35876	7,04143
116	0,81190949	0,87914428	0,34553	6,72348
117	0,79707209	0,86987812	0,37961	7,28060
118	0,78785165	0,86029603	0,38203	7,24444
119	0,77514013	0,85040207	0,40244	7,52619
120	0,77188032	0,84020055	0,36833	6,83202
121	0,75848057	0,82969595	0,38975	7,12154
122	0,74443347	0,81889299	0,41401	7,44595
123	0,73713377	0,80779659	0,39756	7,06628
124	0,73713377	0,79641191	0,33591	5,92781
125	0,73340776	0,78474433	0,29383	5,13366
126	0,72962805	0,77279945	0,24965	4,31714
127	0,70982781	0,76058313	0,29994	5,07553
128	0,6882113	0,74810147	0,36239	5,98902
129	0,67892879	0,73536079	0,34676	5,64320
130	0,66920757	0,7223677	0,33197	5,31601
131	0,67892879	0,70912903	0,18901	3,02002
132	0,66920757	0,69565188	0,16831	2,64443
133	0,67892879	0,68194363	0,01924	0,30148
134	0,68362111	0,6680119	0,10031	1,56092
135	0,6882113	0,65386461	0,22234	3,43467

136	0,69270537	0,63950992	0,34701	5,31954
137	0,69710895	0,62495631	0,47451	7,21526
138	0,70566568	0,61021251	0,63118	9,54532
139	0,70566568	0,59528755	0,73872	11,03781
140	0,71391794	0,58019075	0,90077	13,37272
141	0,72189688	0,56493173	1,06479	15,69651
142	0,71793975	0,54952042	1,16104	16,84193
143	0,71793975	0,53396702	1,28574	18,39727
144	0,71793975	0,51828207	1,41522	19,96577
145	0,71391794	0,50247643	1,52533	21,14415
146	0,70982781	0,48656125	1,64015	22,32666
147	0,70982781	0,47054805	1,78549	23,92798
148	0,70982781	0,45444866	1,93668	25,53792
149	0,71793975	0,43827525	2,14341	27,96645
150	0,70142751	0,42204037	2,20629	27,93871
151	0,72579183	0,40575692	2,52546	32,00349
152	0,72962805	0,38943819	2,72663	34,01899
153	0,73713377	0,37309787	2,95724	36,40359
154	0,74443347	0,35675005	3,19462	38,76834
155	0,74080832	0,34040928	3,37704	40,03990
156	0,74080832	0,32409057	3,59039	41,67178
157	0,72962805	0,30780942	3,74820	42,18186
158	0,72962805	0,29158187	3,98341	43,80462
159	0,72189688	0,27542455	4,18473	44,64723
160	0,72189688	0,25935472	4,44581	46,25422
161	0,71793975	0,24339035	4,69785	47,45494
162	0,71793975	0,22755019	4,99011	49,03896
163	0,71391794	0,21185389	5,27612	50,20640
164	0,72189688	0,19632211	5,65506	52,55748
165	0,71793975	0,18097669	5,98465	53,69631
166	0,71793975	0,16584082	6,36397	55,20989
167	0,71391794	0,15093934	6,74846	56,29786
168	0,71793975	0,13629904	7,21595	58,16407
169	0,71793975	0,12194913	7,69909	59,59906
170	0,71793975	0,10792176	8,22979	61,00180
171	0,72579183	0,09425292	8,86517	63,15389
172	0,72962805	0,08098353	9,54705	64,86445
173	0,73713377	0,06816115	10,34009	66,89726
174	0,74080832	0,05584256	11,22741	68,49658
175	0,74080832	0,04409795	12,25287	69,67104
176	0,75154415	0,03301821	13,57201	71,85259

177	0,75503338	0,02272901	15,21386	73,23044
178	0,75503338	0,01342266	17,50127	74,16107
179	0,75503338	0,00545263	21,41360	74,95807

<b>ERROR MIN(dB)</b>	<b>ERROR MIN (%)</b>
<b>0</b>	<b>0</b>
<b>ERROR MAX(dB)</b>	<b>ERROR MAX (%)</b>
<b>21,41360386</b>	<b>74,95807489</b>
<b>PROMEDIO ERROR(dB)</b>	<b>PROMEDIO POTENCIA MITAD</b>
<b>2,610436121</b>	<b>-0,372582445</b>
<b>DESVIACION ESTANDAR(dB)</b>	<b>DESVIACION ESTANDAR POTENCIA MITAD</b>
<b>3,991915222</b>	<b>0,260077004</b>
	<b>PROMEDIO ERROR POTENCIA MITAD %</b>
	<b>3,246815018</b>

*Fuente. Excel.*

Con los datos obtenidos en esta antena, se logró afirmar que el modo transversal magnético  $TM_{11}$  hace que el patrón de radiación de la antena anillo circular sea mucho mejor en cuanto a ganancia, directividad y simetría.

El patrón de radiación de esta antena no está del todo mal, aunque los lóbulos secundarios se mezclan con el lóbulo principal debido al ruido que genera el cable de alimentación, además no se tenía certeza de que el material dieléctrico utilizado fuera el mejor para este tipo de aplicaciones de alta frecuencia, por este motivo se decidió pedir a la compañía Norteamericana Rogers [29] un nuevo material para la construcción de los siguientes prototipos.

#### 5.4.4. DISEÑO ANTENA MICROSTRIP ANILLO CIRCULAR NUMERO 4.

Para el diseño de esta antena se dejó el modo TM utilizado en la antena número 3 ( $TM_{11}$ ) y se utilizó el nuevo material dieléctrico RT/duroid 5880 de fibra de vidrio, se cambiaron en el simulador los nuevos parámetros tales como el espesor del dieléctrico  $h=0.38\text{mm}$ , la constante dieléctrica  $\epsilon_r=2.2$  y las pérdidas tangenciales  $\tan\delta=0.0009$ , en la tabla 8 se organizan los nuevos parámetros de diseño

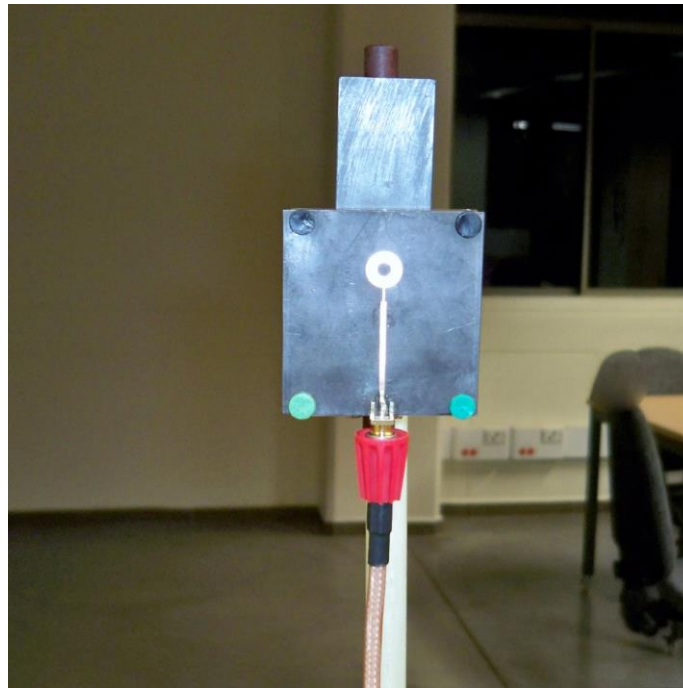
Tabla 8. Parámetros de la antena número 4.

PARAMETRO	RESULTADO
Transversal Magnetico (TM)	$TM_{11}$
Radio Interior (a)	1,89527 mm
Radio Exterior (b)	4,64555 mm
Constante dieléctrica efectiva ( $\epsilon_{ref}$ )	1,96228
Impedancia de entrada del parche ( $Z_{in}$ )	277,067 $\Omega$
Impedancia de la línea de acople $\lambda/4$ ( $Z_L$ )	117,7 $\Omega$
Ancho de la línea de acople $\lambda/4$ ( $W_o$ )	0,176318 mm
Ancho de la línea de alimentación $Z_c=50\Omega$ ( $W_L$ )	1,13841 mm

Fuente. Autor.

La siguiente figura muestra la antena construida con el nuevo material, este material es muy delgado, esto lo hace flexible y la antena no quedaba totalmente plana dificultando el registro de los datos, para solucionar este problema se construyó una base sólida en acrílico transparente con las medidas exactas de la antena.

Figura 45. Antena número 4.

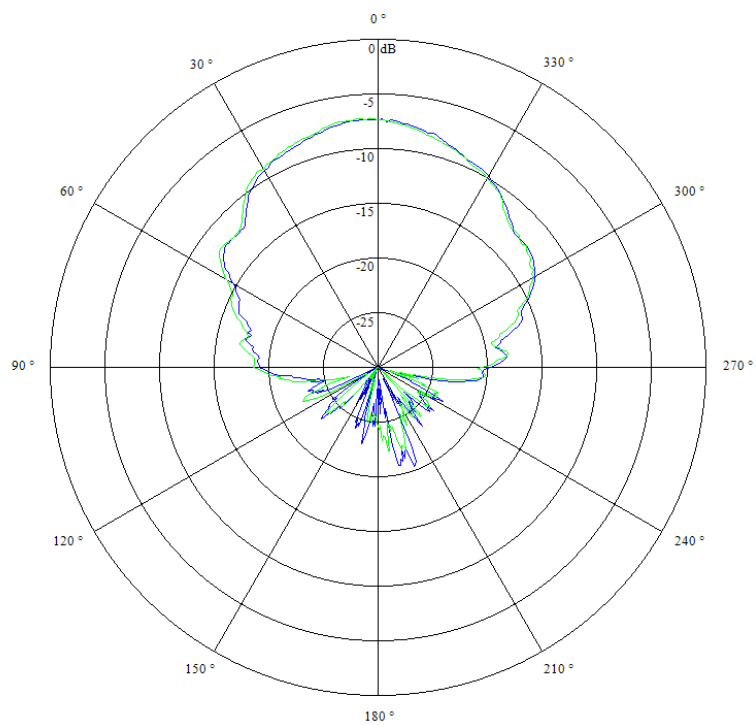


Fuente. Autor.



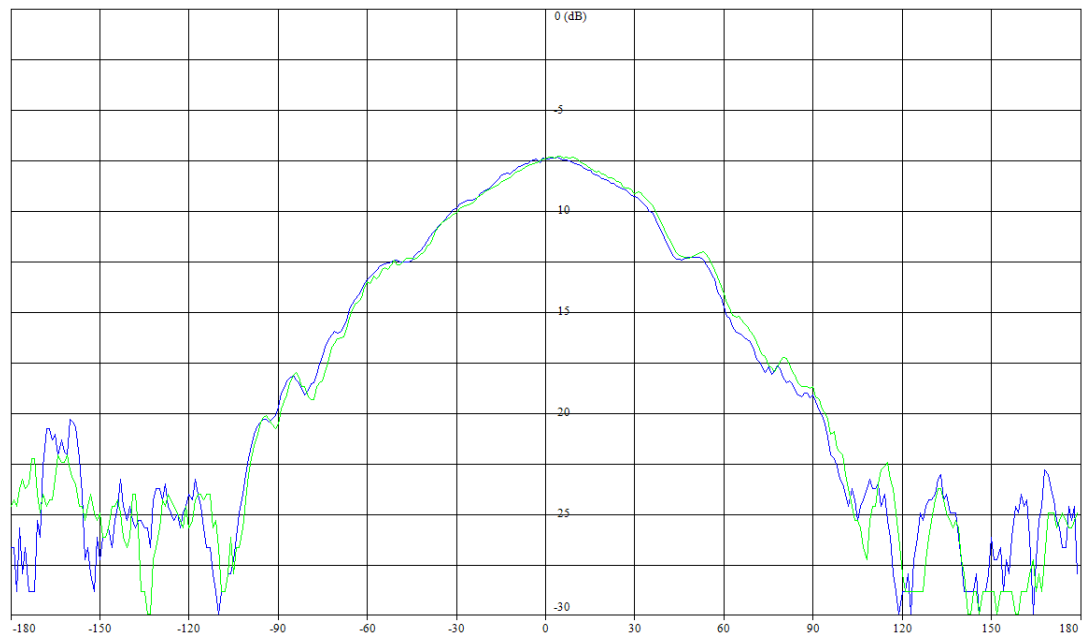
Los datos obtenidos mediante el LVDAM-ANT se muestran en las figuras 46 y 47.

*Figura 46. Patrón de radiación antena número 4.*



*Fuente. LVDAM-ANT.*

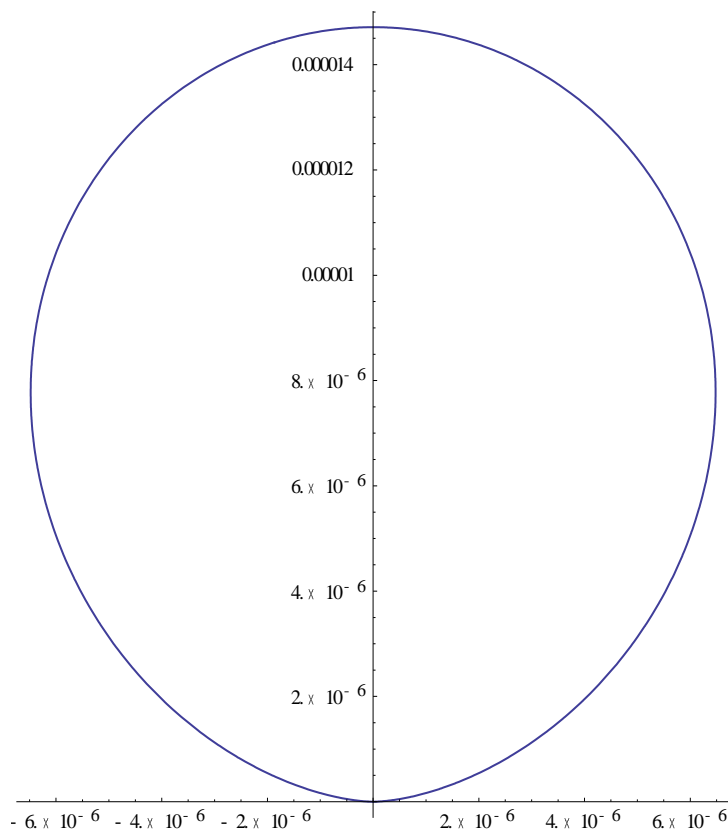
Figura 47. Campo eléctrico y magnético en coordenadas cartesianas.



Fuente. LVDAM-ANT.

El patrón de radiación simulado en wólfam Mathematica 9

Figura 48. Patrón de radiación simulado antena número 4.



Fuente. Wolfram Mathematica 9.

La tabla número 9 recopila de manera detallada los datos teóricos y experimentales tomados en las pruebas hechas a esta antena

Tabla 9. Datos medidos por lab-volt y simulados en mathematica 9.

ANGULO	E(LABVOLT)NORMALIZADO	E(MATHEMATICA)NORMALIZADO	ERROR(dB)	ERROR (%)
1//5	0,24186889	0,00549376	16,43710	23,63751
2	0,24186889	0,01352383	12,52480	22,83451
3	0,24186889	0,02290007	10,23743	21,89688
4	0,25011248	0,03326618	8,76132	21,68463
5	0,2574083	0,04442824	7,62963	21,29801
6	0,27200155	0,05625944	6,84376	21,57421
7	0,28763064	0,06866801	6,22081	21,89626
8	0,29231336	0,08158302	5,54249	21,07303
9	0,29967836	0,09494708	4,99174	20,47313
10	0,30523749	0,10871203	4,48360	19,65255
11	0,30792111	0,12283646	3,99112	18,50847

12	0,31054702	0,13728389	3,54508	17,32631
13	0,31438534	0,15202171	3,15557	16,23636
14	0,3193337	0,16702029	2,81476	15,23134
15	0,32643797	0,18225244	2,53127	14,41855
16	0,32986351	0,19769293	2,22343	13,21706
17	0,32527806	0,2133182	1,83227	11,19599
18	0,33540784	0,22910606	1,65537	10,63018
19	0,34286306	0,24503551	1,45892	9,78275
20	0,34900523	0,2610866	1,26047	8,79186
21	0,35397017	0,27724027	1,06110	7,67299
22	0,36165815	0,29347827	0,90722	6,81799
23	0,36446787	0,30978307	0,70602	5,46848
24	0,36815717	0,32613779	0,52632	4,20194
25	0,36632037	0,34252615	0,29167	2,37942
26	0,36724072	0,35893245	0,09938	0,83083
27	0,37357787	0,37534147	0,02045	0,17636
28	0,38576163	0,39173848	0,06677	0,59769
29	0,39494391	0,40810923	0,14241	1,31653
30	0,40223868	0,42443989	0,23332	2,22012
31	0,40700483	0,44071705	0,34560	3,37122
32	0,41092222	0,45692768	0,46088	4,60055
33	0,4155618	0,47305918	0,56280	5,74974
34	0,42165138	0,48909928	0,64443	6,74479
35	0,42689663	0,5050361	0,73000	7,81395
36	0,43717713	0,52085812	0,76062	8,36810
37	0,4507391	0,53655414	0,75688	8,58150
38	0,46186278	0,55211333	0,77515	9,02506
39	0,47140625	0,56752518	0,80590	9,61189
40	0,47879444	0,58277952	0,85355	10,39851
41	0,49135581	0,59786647	0,85208	10,65107
42	0,50240677	0,61277652	0,86247	11,03697
43	0,50883478	0,62750042	0,91037	11,86656
44	0,51330486	0,64202927	0,97179	12,87244
45	0,52407088	0,65635444	0,97748	13,22836
46	0,52532983	0,67046763	1,05946	14,51378
47	0,53285033	0,68436081	1,08680	15,15105
48	0,53783514	0,69802625	1,13223	16,01911
49	0,55020845	0,7114565	1,11621	16,12480
50	0,55082422	0,7246444	1,19112	17,38202
51	0,56491186	0,73758305	1,15830	17,26712
52	0,58009239	0,75026585	1,11718	17,01735

53	0,59396094	0,76268642	1,08588	16,87255
54	0,61015158	0,77483867	1,03774	16,46871
55	0,62686899	0,78671677	0,98642	15,98478
56	0,6435398	0,79831512	0,93599	15,47753
57	0,66137806	0,80962839	0,87836	14,82503
58	0,67624466	0,82065145	0,84055	14,44068
59	0,69529992	0,83137944	0,77627	13,60795
60	0,71620425	0,84180771	0,70176	12,56035
61	0,72639101	0,85193184	0,69234	12,55408
62	0,73419867	0,86174761	0,69566	12,75489
63	0,74926253	0,87125104	0,65509	12,19885
64	0,76015359	0,88043832	0,63798	12,02847
65	0,77047745	0,88930587	0,62291	11,88284
66	0,78450977	0,89785028	0,58606	11,33405
67	0,78818306	0,90606834	0,60534	11,78853
68	0,79308984	0,91395701	0,61603	12,08672
69	0,80355125	0,92151345	0,59488	11,79622
70	0,81716322	0,92873496	0,55583	11,15717
71	0,82836519	0,93561902	0,52877	10,72538
72	0,83524121	0,94216328	0,52314	10,69221
73	0,83774747	0,94836553	0,53863	11,06181
74	0,84654502	0,95422372	0,52000	10,76787
75	0,85981788	0,95973594	0,47745	9,99181
76	0,87127146	0,96490041	0,44329	9,36289
77	0,88023055	0,9697155	0,42048	8,94850
78	0,88023055	0,97417972	0,44043	9,39492
79	0,89052531	0,97829168	0,40822	8,77664
80	0,89828767	0,98205015	0,38718	8,37625
81	0,90478305	0,98545398	0,37092	8,06709
82	0,91522922	0,98850217	0,33448	7,32730
83	0,92442464	0,99119383	0,30287	6,67692
84	0,93698833	0,99352816	0,25446	5,65398
85	0,95166181	0,9955045	0,19561	4,38427
86	0,96309587	0,99712226	0,15079	3,40264
87	0,9746166	0,99838101	0,10463	2,37644
88	0,9862256	0,99928036	0,05711	1,30548
89	0,99171935	0,99982008	0,03533	0,81007
90	1	1	0,00000	0,00000
91	0,99861678	0,99982008	0,00523	0,12033
92	0,99516455	0,99928036	0,01792	0,41158
93	0,99309644	0,99838101	0,02305	0,52846

94	0,99171935	0,99712226	0,02360	0,54029
95	0,99171935	0,9955045	0,01654	0,37851
96	0,9910324	0,99352816	0,01092	0,24958
97	0,98280176	0,99119383	0,03693	0,83921
98	0,97733956	0,98850217	0,04932	1,11626
99	0,9746166	0,98545398	0,04803	1,08374
100	0,97257703	0,98205015	0,04210	0,94731
101	0,9678291	0,97829168	0,04670	1,04626
102	0,96242085	0,97417972	0,05274	1,17589
103	0,95099164	0,9697155	0,08468	1,87239
104	0,94430771	0,96490041	0,09369	2,05927
105	0,93300974	0,95973594	0,12266	2,67262
106	0,93102437	0,95422372	0,10689	2,31993
107	0,90608531	0,94836553	0,19807	4,22802
108	0,90478305	0,94216328	0,17582	3,73802
109	0,89504911	0,93561902	0,19252	4,05699
110	0,88923504	0,92873496	0,18875	3,94999
111	0,8744656	0,92151345	0,22759	4,70478
112	0,86172217	0,91395701	0,25559	5,22348
113	0,84906614	0,90606834	0,28219	5,70022
114	0,83712054	0,89785028	0,30416	6,07297
115	0,83649407	0,88930587	0,26588	5,28118
116	0,81964701	0,88043832	0,31072	6,07913
117	0,81096524	0,87125104	0,31141	6,02858
118	0,80355125	0,86174761	0,30367	5,81964
119	0,78512124	0,85193184	0,35468	6,68106
120	0,7698694	0,84180771	0,38796	7,19383
121	0,75954737	0,83137944	0,39244	7,18321
122	0,74684784	0,82065145	0,40927	7,38036
123	0,74142102	0,80962839	0,38221	6,82074
124	0,73359756	0,79831512	0,36716	6,47176
125	0,72519108	0,78671677	0,35366	6,15257
126	0,71022275	0,77483867	0,37817	6,46159
127	0,69947452	0,76268642	0,37574	6,32119
128	0,68040968	0,75026585	0,42445	6,98562
129	0,65721641	0,73758305	0,50103	8,03666
130	0,64413445	0,7246444	0,51148	8,05099
131	0,62686899	0,7114565	0,54972	8,45875
132	0,61493443	0,69802625	0,55043	8,30918
133	0,60536303	0,68436081	0,53269	7,89978
134	0,58914631	0,67046763	0,56155	8,13213

135	0,5813013	0,65635444	0,52737	7,50531
136	0,56369216	0,64202927	0,56513	7,83371
137	0,54712666	0,62750042	0,59526	8,03738
138	0,54156007	0,61277652	0,53655	7,12164
139	0,52218004	0,59786647	0,58784	7,56864
140	0,51011456	0,58277952	0,57837	7,26650
141	0,50562691	0,56752518	0,50155	6,18983
142	0,49592585	0,55211333	0,46611	5,61875
143	0,49462326	0,53655414	0,35339	4,19309
144	0,48741445	0,52085812	0,28821	3,34437
145	0,489388	0,5050361	0,13669	1,56481
146	0,48477418	0,48909928	0,03858	0,43251
147	0,48079393	0,47305918	0,07044	0,77348
148	0,46665525	0,45692768	0,09149	0,97276
149	0,45633207	0,44071705	0,15121	1,56150
150	0,44507905	0,42443989	0,20621	2,06392
151	0,43207013	0,40810923	0,24778	2,39609
152	0,4155618	0,39173848	0,25639	2,38233
153	0,39494391	0,37534147	0,22109	1,96024
154	0,38405744	0,35893245	0,29383	2,51250
155	0,36906985	0,34252615	0,32415	2,65437
156	0,35592035	0,32613779	0,37952	2,97826
157	0,35100708	0,30978307	0,54258	4,12240
158	0,34799603	0,29347827	0,73998	5,45178
159	0,34596058	0,27724027	0,96170	6,87203
160	0,33757239	0,2610866	1,11582	7,64858
161	0,33970864	0,24503551	1,41878	9,46731
162	0,34181816	0,22910606	1,73759	11,27121
163	0,34390167	0,2133182	2,07406	13,05835
164	0,33540784	0,19769293	2,29582	13,77149
165	0,32758845	0,18225244	2,54655	14,53360
166	0,32643797	0,16702029	2,91031	15,94177
167	0,324109	0,15202171	3,28785	17,20873
168	0,3217418	0,13728389	3,69888	18,44579
169	0,3193337	0,12283646	4,14917	19,64972
170	0,31438534	0,10871203	4,61185	20,56733
171	0,31183925	0,09494708	5,16449	21,68922
172	0,30924103	0,08158302	5,78697	22,76580
173	0,30387265	0,06866801	6,45937	23,52046
174	0,30523749	0,05625944	7,34442	24,89781
175	0,29382764	0,04442824	8,20434	24,93994

176	0,28601937	0,03326618	9,34393	25,27532
177	0,27928513	0,02290007	10,86211	25,63851
178	0,26608566	0,01352383	12,93922	25,25618
179	0,2681069	0,00549376	16,88438	26,26131

<b>ERROR MIN(dB)</b>	<b>ERROR MIN (%)</b>
<b>0</b>	<b>0</b>
<b>ERROR MAX(dB)</b>	<b>ERROR MAX (%)</b>
<b>16,88438241</b>	<b>26,26131396</b>
<b>PROMEDIO ERROR(dB)</b>	<b>PROMEDIO POTENCIA MITAD</b>
<b>1,506831647</b>	<b>-0,675481644</b>
<b>DESVIACION ESTANDAR(dB)</b>	<b>DESVIACION ESTANDAR POTENCIA MITAD</b>
<b>2,645773951</b>	<b>0,503515232</b>
	<b>PROMEDIO ERROR POTENCIA MITAD %</b>
	<b>6,366609002</b>

*Fuente. Excel.*

El patrón de radiación de este prototipo presentó gran mejoría con respecto a los prototipos antes diseñados debido al cambio del material dieléctrico, esta antena presenta una atenuación de -7,26 dB lo que proporciona una buena ganancia. La simetría de esta antena también mejora debido a que las propiedades del material que no se ve muy afectado por ruidos presentes en el ambiente del laboratorio en el cual se tomaron los datos (interferencias, reflexiones causadas por los cables y materiales metálicos presentes...).

#### 5.4.5. DISEÑO ANTENA MICROSTRIP ANILLO CIRCULAR NUMERO 5.

Este es el último prototipo, diseñado con el objetivo de mejorar la ganancia con respecto a la antena número 4. Para esto se rediseñó únicamente la línea de acople utilizando la constante dieléctrica efectiva que disminuyó el largo de la línea  $\lambda/4$  a 5,05 mm para garantizar una mayor transferencia de potencia al parche y eliminar por completo algunos efectos de borde no deseados.



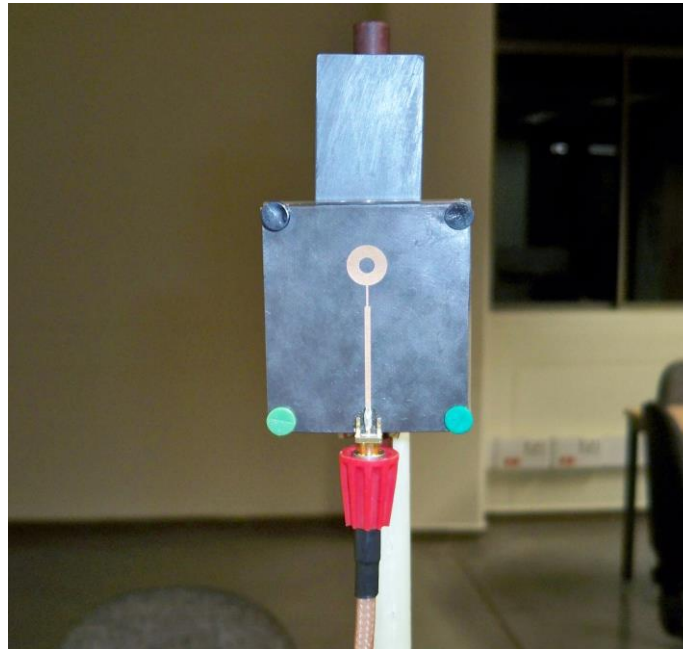
Tabla 10. Parámetros de la antena número 5.

PARAMETRO	RESULTADO
Transversal Magnetico (TM)	$TM_{11}$
Radio Interior (a)	1,89527 mm
Radio Exterior (b)	4,64555 mm
Constante dieléctrica efectiva ( $\epsilon_{ref}$ )	1,96228
Impedancia de entrada del parche ( $Z_{in}$ )	212,374 $\Omega$
Impedancia de la línea de acople $\lambda/4$ ( $Z_L$ )	103,047 $\Omega$
Ancho de la línea de acople $\lambda/4$ ( $W_o$ )	0,269243 mm
Ancho de la línea de alimentación $Z_c=50\Omega$ ( $W_L$ )	1,13841 mm

Fuente. Autor.

A continuación se muestra la antena 5, quien fue la de mejores resultados.

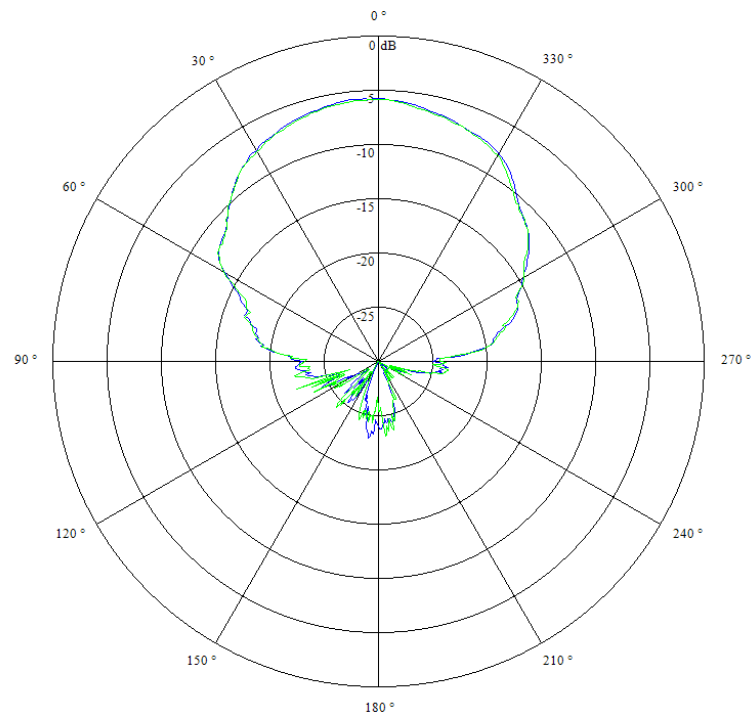
Figura 49. Antena número 5.



Fuente. Autor.

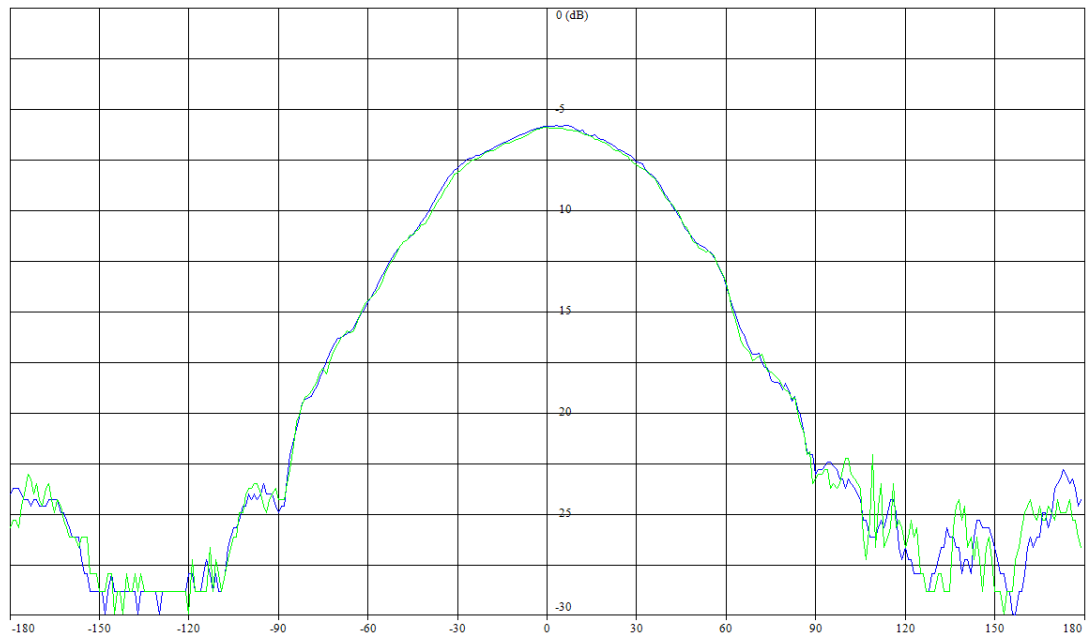
Los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio que corroboran la mejoría en cuanto a la ganancia se observan en las figuras 50 y 51.

Figura 50. Patrón de radiación antena número 5.



Fuente. LVDAM-ANT.

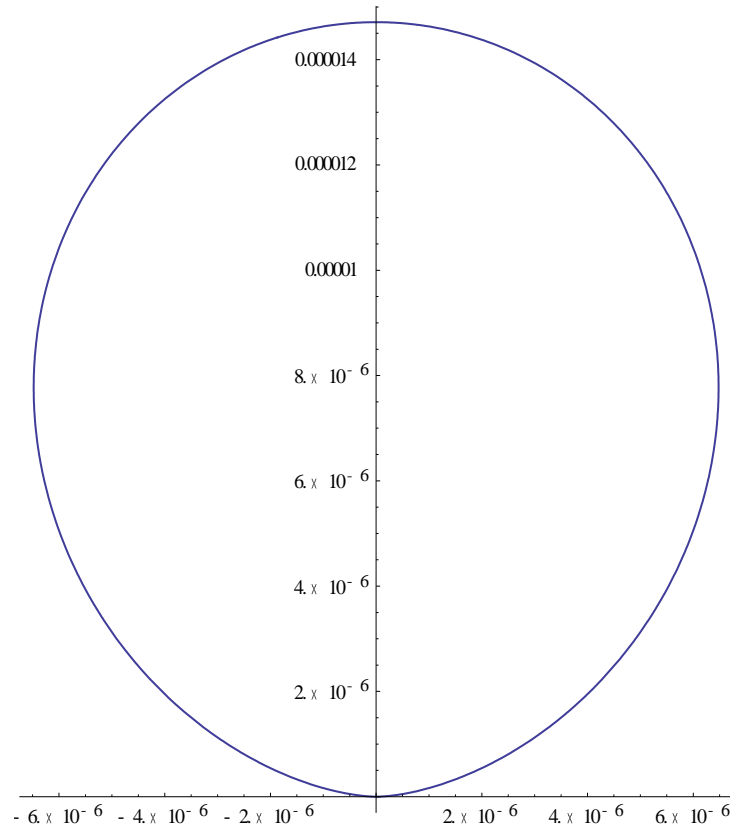
Figura 51. Campo eléctrico y magnético en coordenadas cartesianas.



Fuente. LVDAM-ANT.

El patrón de radiación simulado en wólfram Mathematica 9

Figura 52. Patrón de radiación antena número 5.



Fuente. Wolfram Mathematica 9.

La tabla número 11 muestra de forma organizada los datos teóricos (tomados de mathematica 9) y experimentales (tomados del LVDAM-ANT) arrojados en las pruebas hechas a la antena final

Tabla 11. Datos medidos por lab-volt y simulados en mathematica 9.

ANGULO	E(LABVOLT)NORMALIZADO	E(MATHEMATICA)NORMALIZADO	ERROR(dB)	ERROR (%)
1	0,364271949	0,096451972	5,771146	26,78200
2	0,36095367	0,146168708	3,925971	21,47850
3	0,367482053	0,186373733	2,948514	18,11083
4	0,367482053	0,221398046	2,200623	14,60840
5	0,364271949	0,252985721	1,583297	11,12862
6	0,379412092	0,282053476	1,287797	9,73586
7	0,387583955	0,309155404	0,981889	7,84286
8	0,400082286	0,334657131	0,775492	6,54252
9	0,404760963	0,358815013	0,523280	4,59460
10	0,411492954	0,381816981	0,325072	2,96760
11	0,413667924	0,403805601	0,104795	0,98623

12	0,417923347	0,424891998	0,071819	0,69687
13	0,422061967	0,445164726	0,231445	2,31028
14	0,424090511	0,46469566	0,397101	4,06051
15	0,422061967	0,483544058	0,590598	6,14821
16	0,428071659	0,501759438	0,689791	7,36878
17	0,433867004	0,519383667	0,781317	8,55167
18	0,441300022	0,536452518	0,847973	9,51525
19	0,446678217	0,552996849	0,927279	10,63186
20	0,456995674	0,569043504	0,952334	11,20478
21	0,463587546	0,584616023	1,007390	12,10285
22	0,469979152	0,599735201	1,058809	12,97560
23	0,479232802	0,614419537	1,079185	13,51867
24	0,483724752	0,628685592	1,138352	14,49608
25	0,491031185	0,642548291	1,167967	15,15171
26	0,496728477	0,656021158	1,207988	15,92927
27	0,502305246	0,669116524	1,245340	16,68113
28	0,513132912	0,681845693	1,234562	16,87128
29	0,515777539	0,69421908	1,290341	17,84415
30	0,524857041	0,706246336	1,289152	18,13893
31	0,534927463	0,717936445	1,277911	18,30090
32	0,541071598	0,729297811	1,296502	18,82262
33	0,551872913	0,740338331	1,275912	18,84654
34	0,55890578	0,751065459	1,283392	19,21597
35	0,568094549	0,761486261	1,272415	19,33917
36	0,578199408	0,771607459	1,253188	19,34081
37	0,586995182	0,781435473	1,242586	19,44403
38	0,594560545	0,790976456	1,239675	19,64159
39	0,605175764	0,800236325	1,213367	19,50606
40	0,60936309	0,809220781	1,231909	19,98577
41	0,620720981	0,817935342	1,198225	19,72144
42	0,631866276	0,826385351	1,165574	19,45191
43	0,639851797	0,834576001	1,153865	19,47242
44	0,649703229	0,842512344	1,128612	19,28091
45	0,665195982	0,850199306	1,065711	18,50033
46	0,677567051	0,857641697	1,023536	18,00746
47	0,686029283	0,864844218	1,005952	17,88149
48	0,698120035	0,87181147	0,964925	17,36914
49	0,709153839	0,878547958	0,930250	16,93941
50	0,724600475	0,885058099	0,868732	16,04576
51	0,738070934	0,891346223	0,819483	15,32753
52	0,747865246	0,897416578	0,791707	14,95513

53	0,760238412	0,903273328	0,748694	14,30349
54	0,773394112	0,908920561	0,701251	13,55264
55	0,78992505	0,914362286	0,635324	12,44372
56	0,801162125	0,919602432	0,598797	11,84403
57	0,808910775	0,924644852	0,580743	11,57341
58	0,819206512	0,929493318	0,548529	11,02868
59	0,832026006	0,934151524	0,502804	10,21255
60	0,836288345	0,938623083	0,501352	10,23347
61	0,849045358	0,942911524	0,455401	9,38662
62	0,854136874	0,947020292	0,448318	9,28834
63	0,865150524	0,950952748	0,410673	8,58022
64	0,871916753	0,954712163	0,393974	8,27954
65	0,877830897	0,958301717	0,380914	8,04708
66	0,888801855	0,961724498	0,342457	7,29226
67	0,891331452	0,964983499	0,344807	7,36520
68	0,903128501	0,968081614	0,301624	6,49531
69	0,910706821	0,971021639	0,278503	6,03148
70	0,923330799	0,973806264	0,231152	5,04755
71	0,928379033	0,976438076	0,219194	4,80590
72	0,930061297	0,978919555	0,222354	4,88583
73	0,935109297	0,981253067	0,209187	4,61438
74	0,940999252	0,983440869	0,191590	4,24416
75	0,951096954	0,985485102	0,154253	3,43881
76	0,95446393	0,987387788	0,147282	3,29239
77	0,962041295	0,989150831	0,120688	2,71095
78	0,972993028	0,990776012	0,078658	1,77830
79	0,979737575	0,992264992	0,055179	1,25274
80	0,97805089	0,993619301	0,068586	1,55684
81	0,985642282	0,994840347	0,040341	0,91981
82	0,981424291	0,995929406	0,063718	1,45051
83	0,985642282	0,996887624	0,049269	1,12453
84	0,991551264	0,997716016	0,026918	0,61648
85	0,995774596	0,998415464	0,011503	0,26409
86	0,99324047	0,998986717	0,025053	0,57462
87	0,991551264	0,999430387	0,034374	0,78791
88	0,989862959	0,999746953	0,043150	0,98840
89	0,991551264	0,999936755	0,036574	0,83855
90	1	1	0,000000	0,00000
91	0,999154672	0,999936755	0,003398	0,07821
92	0,994084973	0,999746953	0,024666	0,56620
93	0,98901843	0,999430387	0,045482	1,04120

94	0,987330168	0,998986717	0,050973	1,16565
95	0,981424291	0,998415464	0,074545	1,69912
96	0,979737575	0,997716016	0,078972	1,79784
97	0,971307439	0,996887624	0,112895	2,55802
98	0,967094705	0,995929406	0,127596	2,88347
99	0,956989169	0,994840347	0,168464	3,78512
100	0,951938677	0,993619301	0,186110	4,16806
101	0,947730516	0,992264992	0,199428	4,45345
102	0,935950674	0,990776012	0,247225	5,48253
103	0,930061297	0,989150831	0,267509	5,90895
104	0,924171867	0,987387788	0,287350	6,32159
105	0,919964567	0,985485102	0,298790	6,55205
106	0,914073795	0,983440869	0,317670	6,93671
107	0,908181048	0,981253067	0,336086	7,30720
108	0,896388929	0,978919555	0,382505	8,25306
109	0,883740092	0,976438076	0,433201	9,26980
110	0,867688792	0,973806264	0,501086	10,61175
111	0,85583301	0,971021639	0,548399	11,51886
112	0,849894419	0,968081614	0,565470	11,81872
113	0,841396225	0,964983499	0,595193	12,35873
114	0,832878918	0,961724498	0,624688	12,88456
115	0,816635774	0,958301717	0,694739	14,16659
116	0,804608946	0,954712163	0,742876	15,01032
117	0,790791842	0,950952748	0,800968	16,01609
118	0,77775782	0,947020292	0,855149	16,92625
119	0,762877467	0,942911524	0,920162	18,00341
120	0,747865246	0,938623083	0,986679	19,07578
121	0,738964274	0,934151524	1,017939	19,51873
122	0,726404549	0,929493318	1,070677	20,30888
123	0,710068304	0,924644852	1,146748	21,45765
124	0,701810594	0,919602432	1,173802	21,77918
125	0,696269727	0,914362286	1,183408	21,80926
126	0,682278254	0,908920561	1,245644	22,66423
127	0,670928555	0,903273328	1,291429	23,23448
128	0,668067427	0,897416578	1,281738	22,93492
129	0,672830558	0,891346223	1,221407	21,85157
130	0,650681083	0,885058099	1,336036	23,43770
131	0,633871956	0,878547958	1,417639	24,46760
132	0,618672217	0,87181147	1,489620	25,31393
133	0,614553629	0,864844218	1,483781	25,02906
134	0,606225705	0,857641697	1,506715	25,14160

135	0,590251749	0,850199306	1,584835	25,99476
136	0,588083225	0,842512344	1,561375	25,44291
137	0,608319186	0,834576001	1,373344	22,62568
138	0,585904548	0,826385351	1,493557	24,04808
139	0,565816437	0,817935342	1,600434	25,21189
140	0,52357617	0,809220781	1,890872	28,56446
141	0,507770551	0,800236325	1,975508	29,24658
142	0,506414169	0,790976456	1,936577	28,45623
143	0,491031185	0,781435473	2,017840	29,04043
144	0,476189791	0,771607459	2,096163	29,54177
145	0,471547948	0,761486261	2,081362	28,99383
146	0,469979152	0,751065459	2,035992	28,10863
147	0,456995674	0,740338331	2,095181	28,33427
148	0,44311044	0,729297811	2,163929	28,61874
149	0,439471329	0,717936445	2,131555	27,84651
150	0,426093415	0,706246336	2,194514	28,01529
151	0,428071659	0,69421908	2,099801	26,61474
152	0,426093415	0,681845693	2,041813	25,57523
153	0,417923347	0,669116524	2,044051	25,11932
154	0,409284684	0,656021158	2,048924	24,67365
155	0,400082286	0,642548291	2,057564	24,24660
156	0,392734343	0,628685592	2,043346	23,59512
157	0,384923611	0,614419537	2,030905	22,94959
158	0,387583955	0,599735201	1,895938	21,21512
159	0,392734343	0,584616023	1,727718	19,18817
160	0,387583955	0,569043504	1,667797	18,14595
161	0,390186395	0,552996849	1,514505	16,28105
162	0,376551724	0,536452518	1,537066	15,99008
163	0,373614179	0,519383667	1,430649	14,57695
164	0,373614179	0,501759438	1,280722	12,81453
165	0,357516466	0,483544058	1,311400	12,60276
166	0,36095367	0,46469566	1,097172	10,37420
167	0,364271949	0,445164726	0,870950	8,08928
168	0,333470011	0,424891998	1,052218	9,14220
169	0,350231	0,403805601	0,618178	5,35746
170	0,311801467	0,381816981	0,879771	7,00155
171	0,328651087	0,358815013	0,381355	3,01639
172	0,33710055	0,334657131	0,031594	0,24434
173	0,317904819	0,309155404	0,121203	0,87494
174	0,316653957	0,282053476	0,502535	3,46005
175	0,308400629	0,252985721	0,860192	5,54149



176	0,308400629	0,221398046	1,439415	8,70026
177	0,308400629	0,186373733	2,187306	12,20269
178	0,309948699	0,146168708	3,264354	16,37800
179	0,308400629	0,096451972	5,048041	21,19487

<b>ERROR MIN(dB)</b>	<b>ERROR MIN (%)</b>
<b>0</b>	<b>0</b>
<b>ERROR MAX(dB)</b>	<b>ERROR MAX (%)</b>
<b>5,048041442</b>	<b>29,54176676</b>
<b>PROMEDIO ERROR(dB)</b>	<b>PROMEDIO POTENCIA MITAD</b>
<b>0,963126206</b>	<b>-0,475748415</b>
<b>DESVIACION ESTANDAR(dB)</b>	<b>DESVIACION ESTANDAR POTENCIA MITAD</b>
<b>0,77475738</b>	<b>0,398669456</b>
	<b>PROMEDIO ERROR POTENCIA MITAD %</b>
	<b>6,9873034</b>

*Fuente. Excel.*

El patrón de radiación de esta antena presenta una atenuación de -5,77 dB que mejora al del prototipo anterior y en consecuencia genera una mejor ganancia, una mejor simetría y directividad, además, el lóbulo principal es semejante al lóbulo simulado; por estas razones se decide dejar la antena número 5 como la antena final del proyecto.

## 6. ANALISIS DE RESULTADOS

### 6.1. ANALISIS DE RESULTADOS ANTENA MICROSTRIP ANILLO CIRCULAR.

Cada prototipo de antena diseñado y construido fue contrastado con su respectiva simulación en Mathematica 9, las tablas 3, 5, 7, 9 y 11 muestran los valores normalizados grado a grado que conforman el lóbulo principal de la antena microstrip (0° a 180°).

El análisis de los resultados obtenidos se hace de manera estadística. En la tabla número 12 se muestra de manera organizada los datos más importantes que

permitirán una comparación entre cada prototipo de antena construido durante la metodología de este proyecto.

*Tabla 12. Comparación datos estadísticos entre cada antena construida.*

	Antena 1	Antena 2	Antena 3	Antena 4	Antena 5
<b>ERROR MINIMO (dB)</b>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<b>ERROR MINIMO (%)</b>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<b>ERROR MAXIMO (dB)</b>	5,0480	20,570	21,413	16,884	5,0480
<b>ERROR MAXIMO (%)</b>	29,541	72,942	74,958	26,261	29,541
<b>PROMEDIO ERROR</b>	0,9631	2,3977	2,6104	1,5068	0,9631
<b>DESVIACION ESTANDAR</b>	0,7747	3,7866	3,9919	2,6457	0,7747
<b>PROMEDIO POTENCIA MITAD</b>	-0,4757	-0,2702	-0,372	-0,675	-0,475
<b>DESVIACION ESTANDAR POTENCIA MITAD</b>	0,3986	0,1628	0,2600	0,5035	0,3986
<b>PROMEDIO ERROR POTENCIA MITAD (%)</b>	6,98730	1,65516	3,2468	6,3666	6,987

*Fuente. Excel.*

Para optimizar el análisis se trabajó con variable estadísticas que significan información simplificada de cada antena construida, probada y simulada, dichas variables son: los errores mínimos y máximos en dB y porcentaje, los promedios de error y la desviación estándar, estos datos califican el funcionamiento experimental con respecto a la teoría y ayudan a definir de forma matemática cual antena cumple con los objetivos de diseño deseados.

Se introdujo el concepto de potencia mitad (-3 dB) en el lóbulo principal como criterio para poder evaluar la directividad, ganancia y ancho de banda de cada prototipo y su simulación.

De la tabla 12 se puede concluir:

- El error mínimo en todas las antenas es cero, esto se debe a que en la simulación y la teoría el valor máximo de radiación del lóbulo principal estaba siempre ubicado en 90° y siempre coincidían.
- El error en dB de la antena número 5 muestra la menor diferencia y por ende menor error que existe entre los valores en dB teórico y experimental grado a grado en el lóbulo principal, con respecto al error porcentual relativamente alto se puede explicar debido a que el patrón simulado no cuenta con condiciones ambientales adversas y cierra su lóbulo en cero grados (0°) mientras que el experimentas se desfasa algunos grados más antes de cerrarse por completo.
- La desviación estándar se utiliza para determinar si los datos medidos experimentalmente están de acuerdo con el modelo teórico, para el caso de la antena número 5 la cual posee la mayor ganancia y la menor desviación estándar de los datos de error, esto significa que los datos de error son

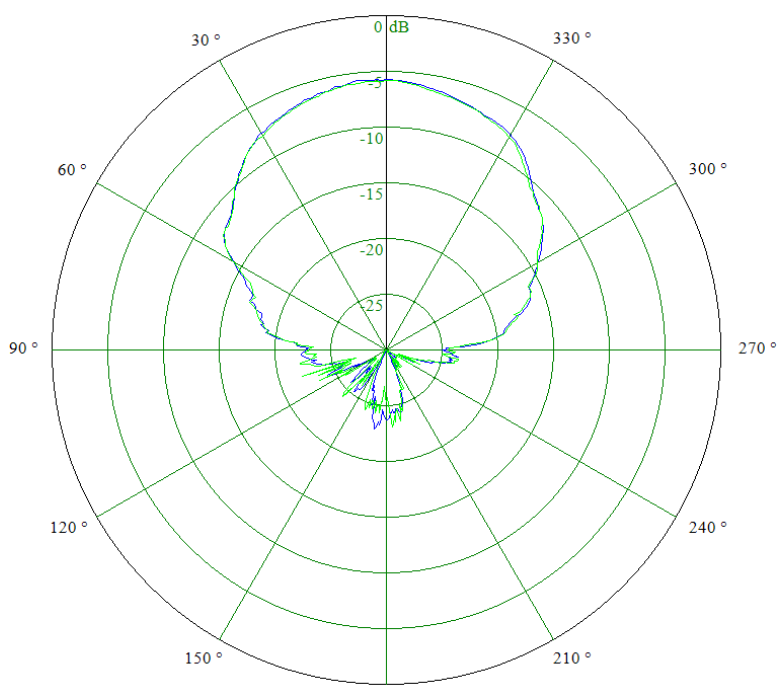
cercanos al promedio lo que demuestran que los datos tomados por el LVDAM.ANT corroboran la teoría utilizada para el diseño.

## 6.2. COMPARACION DE ANTENAS MICROSTRIP REALIZADAS EN LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA

Debido a que en la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga ya hace algunos años se ha seguido una línea de proyectos de diseño y construcción de antenas microstrip, se decidió comparar el patrón de radiación de la antena diseñada en este proyecto con el de las antenas microstrip diseñadas anteriormente, las topologías construidas en la UPB Bucaramanga con anterioridad son: antena microstrip circular, antena microstrip cuadrada, y dos arreglos matriciales de antenas microstrip rectangulares.

El patrón de radiación de la antena final tipo anillo circular (tomado del software LVDAM-ANT) con el cual se realizaran las comparaciones se muestra en la figura 53

*Figura 53. Patrón de radiación de la antena final tipo anillo circular.*



*Fuente. LVDAM-ANT.*

**Proyecto de grado:** ELABORACION DE UN SOFTWARE PARA LA SIMULACIÓN DEL PATRÓN DE RADIACIÓN DE UNA ANTENA MICROCINTA CIRCULAR CON LA HERRAMIENTA MATLAB.

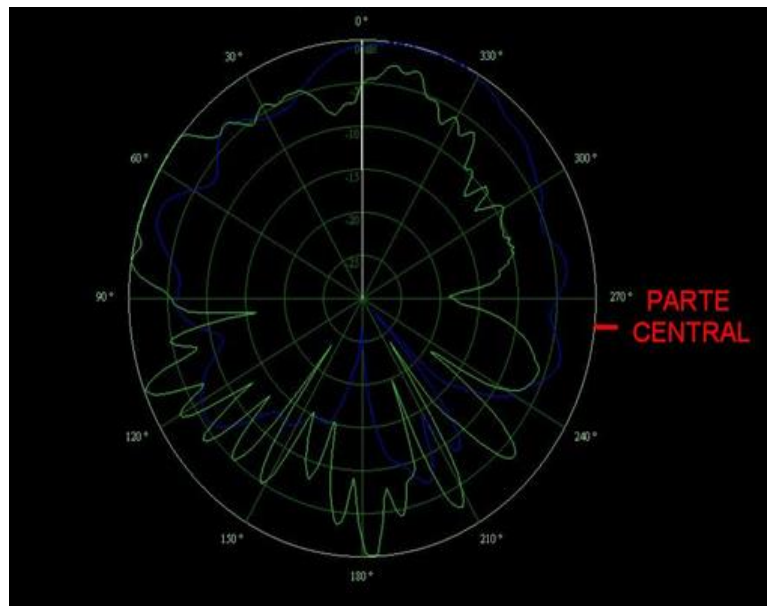
**Año:** 2012.

**Autores:** GABRIEL ENRIQUE GARCIA OTERO

ROXANA LAMUS AVENDAÑO

**Patrón de radiación antena final (tomado del software LVDAM-ANT):**

*Figura 54. Patrón de radiación de la antena final tipo circular*



*Fuente. GABRIEL ENRIQUE GARCIA OTERO, ROXANA LAMUS AVENDAÑO, Elaboración de un software para la simulación del patrón de radiación de una antena microcinta circular con la herramienta matlab, 2012.*

La antena microstrip circular tiene mayor ganancia y radia mayor potencia en ancho de banda mayor comparado con cualquiera de las otras cuatro topologías analizadas.

Pero, el patrón de radiación de la antena circular no tiene buena simetría, con la topología en anillo se mejoró dicho parámetro a costo de reducción de la ganancia y aumento en la directividad.

**Proyecto de grado:** SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DEL DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE UNA ANTENA TIPO PARCHE RECTANGULAR.

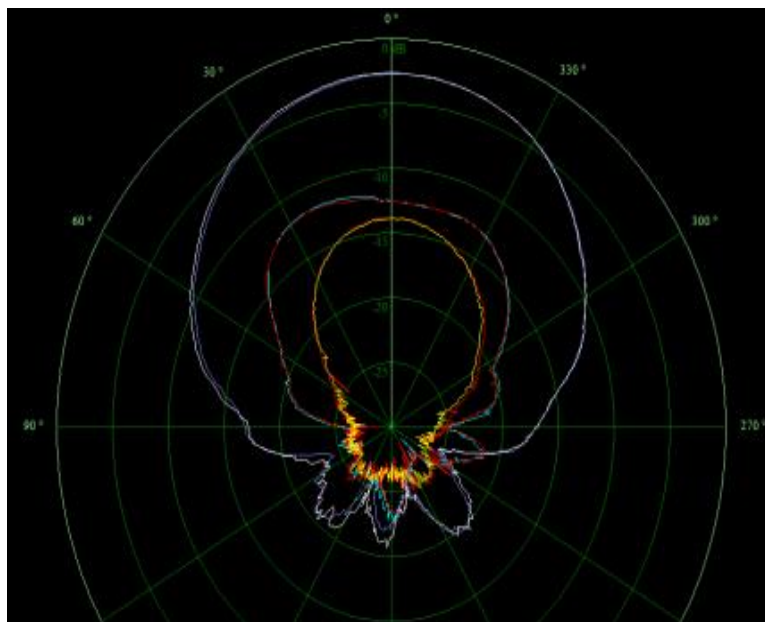
**Año:** 2012

**Autores:** SERGIO MARTÍNEZ CAMPO

ROSA MARÍA JIMÉNEZ BERMÚDEZ

**Patrón de radiación antena final (tomado del software LVDAM-ANT):**

*Figura 55. Patrón de radiación de la antena final tipo rectangular.*



*Fuente. SERGIO MARTÍNEZ CAMPO, ROSA MARÍA JIMÉNEZ BERMÚDEZ, simulación y análisis del diagrama de radiación de una antena tipo parche rectangular, 2012*

La antena microstrip rectangular final diseñada en ese proyecto se diferencia por su color rojo, y la comparan con el patrón de la antena rectangular del equipo Lab-Volt, el patrón diseñado en ese proyecto muestra poca variación del campo radiado, cuando se modifican parámetros físicos del parche su comportamiento es muy similar al que ocurre con la topología en anillo circular sin embargo se reduce significativamente la ganancia y se pierde simetría. Con la disminución del ancho del parche rectangular ( $W$ ), la potencia radiada tiene un mayor ancho de haz de potencia media.

La topología rectangular tiene menor ganancia que la de anillo, en cuanto a directividad y ancho de banda son antenas con características bastante similares.

**Proyecto de grado:** ANALISIS DEL PATRON DE RADIACION DE UNA ANTENA TIPO PARCHE DE ARREGLO MATRICIAL DE PARCHES RECTANGULARES.

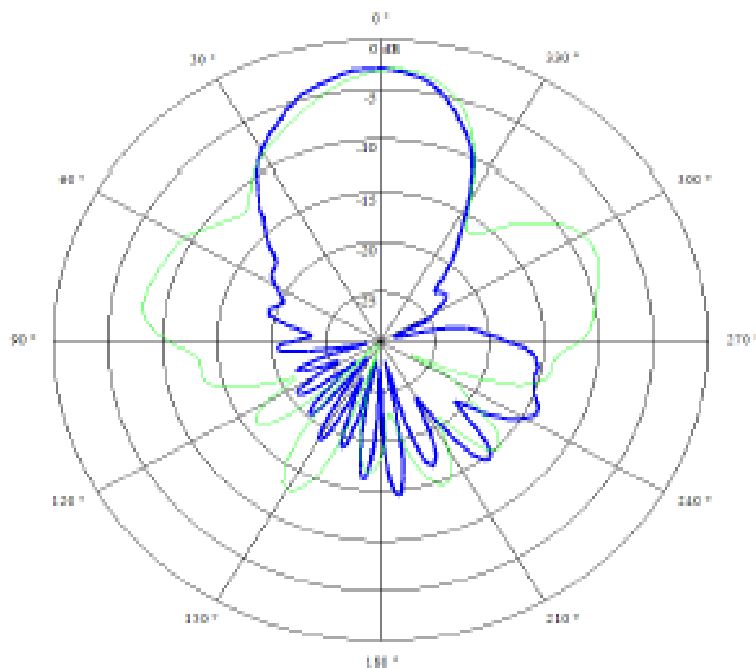
**Año:** 2012.

**Autores:** GUSTAVO JOSE QUINTERO RODRIGUEZ.

LUIS CARLOS SARMIENT LOPEZ.

**Patrón de radiación antena final (tomado del software LVDAM-ANT):**

*Figura 56. Patrón de radiación del arreglo matricial de parches rectangulares.*



*Fuente. GUSTAVO JOSE QUINTERO RODRIGUEZ, LUIS CARLOS SARMIENT LOPEZ, Análisis del patrón de radiación de una antena tipo parche de arreglo matricial de parches rectangulares.*

**Proyecto de grado:** ARREGLO LINEAL DE PARCHE RECTANGULAR PARA UNA ANTENA MICRSOTRIP

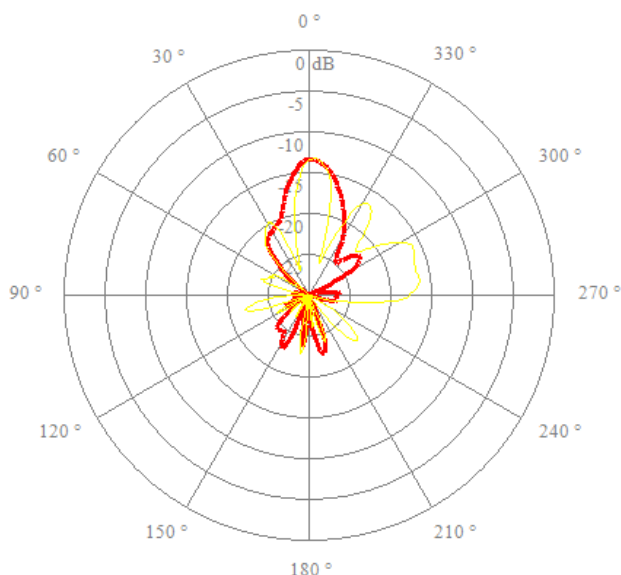
**Año:** 2012

**Autores:** YULI ANDREA ÁLVAREZ PIZARRO

ADRIANA MARIA MURILLO NIÑO

**Patrón de radiación antena final (tomado del software LVDAM-ANT):**

Figura 57. Patrón de radiación del arreglo lineal de parches rectangulares.



Fuente. YULI ANDREA ÁLVAREZ PIZARRO, ADRIANA MARIA MURILLO NIÑO, Arreglo lineal de parche rectangular para una antena microstrip.

Los arreglos de antenas microstrip generan un campo radiado que en comparación con parches individuales tienen pequeño ancho de banda, pérdidas más significativas en la alimentación y manejo de potencias relativamente bajas.

De ahí la importancia de establecer buenos parámetros, métodos y técnicas de diseño para minimizar estas desventajas.

En un arreglo lineal, entre mayor número de parches tenga la antena, hay mayor directividad, por este motivo se puede concluir que los arreglos diseñados al ser comparados con la antena microstrip anillo circular son mucho más directivos.

Algo muy importante y que vale la pena aclarar es que los resultados y comparaciones del patrón de radiación de estas cuatro topologías son meramente cualitativos, los diseños se realizaron y se modelaron con diferentes metodologías, como el método de línea de transmisión o el método de cavidades. Dichos métodos difieren por presentar resultados que no son equidistantes a la frecuencia de resonancia, por esto es imposible cuantificar el error de manera apropiada. Las topologías son óptimas dependiendo de la aplicación y de las necesidades propias del tipo de comunicación que se va a implementar.

## 7. CONCLUSIONES

- En el diseño de una antena microstrip preliminar es normal que el prototipo inicial no cumpla con todas especificaciones requeridas, debido a que no se toman en cuenta varios efectos como *isolation* entre las líneas de transmisión y los elementos radiantes, efectos de carga y atenuaciones. Por esta razón es importante tener un software de simulación confiable como es Mathematica 9, MatLab, NEC (Numerical Electromagnetics Code), entre otros que permiten simular el patrón de radiación para realizar el proceso de optimización.
- La frecuencia y el ancho de banda de una antena microstrip anillo circular dependen principalmente del modo transversal magnético  $TM_{nm}$  al que se opere, con una constante  $X_{nm}$  calculada a partir de la clase y el orden de las funciones de Bessel. El ancho de banda de una antena microstrip es proporcional al volumen de la cavidad. Por esta razón para aumentar el ancho de banda se puede optar por elegir un sustrato con una constante dieléctrica menor o un sustrato con mayor grosor.
- La directividad del patrón de radiación es fundamentalmente controlado por la configuración, el espaciamiento y números de elementos de un arreglo. Tomando en cuenta la ganancia como parámetro principal de diseño en un arreglo la eficiencia puede asumirse similar a la eficiencia del elemento individual.
- Dentro de la literatura consultada para la construcción de una antena microstrip anillo circular no se encontró una ecuación o relación para calcular la impedancia de entrada del parche resonante, razón por la cual se tuvo que optimizar el cálculo de dicha impedancia a partir de una analogía dimensional con parche rectangular.



## 8. REFERENCIAS

- [1] Flores-Cuadras Javier R., “Diseño y construcción de una antena planar activa para el estándar 802.11a en la banda superior de la U-NII”, CICESE, Tesis de maestría, 2006.
- [2] Eklund Carl, et al., Wireless MAN, Inside the IEEE 802.16 Standard for Wireless Networks, IEEE PRESS, New York, 391 p., 2006.
- [3] Bhartia P., Rao K.V.S., Tomar R.S., Millimeter – Wave Microstrip and Printed Circuit Antennas, Artech House, Norwood Massachussets, 322 p., 1991.
- [4] Balanis Constantine A., Antenna theory analysis and design, John Wiley and Sons, 2nd ed., New York, 941 p.
- [5] Qian Y., et al., “A Microstrip Patch Antenna using novel photonic bandgap structures”, Microwave J., Vol 42, pp. 66-76, 1999.
- [6] Kai-Fong Lee, et al, “Circular-disk microstrip antenna with an air gap”, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 32, pp. 880 – 884, 1984.
- [7] Milligan Thomas A., “Bandwidth and efficiency of a microstrip patch antenna”. IEEE Antennas Propagat., vol. 16-1, pp, 585-587, 1980.
- [8] Lubin Yan y Hessel Alexander, “Wide-band, wide-angle microstrip stacked-patch-element phased arrays”, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 39, pp. 1062 – 1070, 1991.
- [9] Katehi Pisti B., et al., “A bandwidth enhancement method for microstrip antennas”, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 35, pp. 5 – 12, 1987.
- [10] Liu Zhang-Fa, et al, “A method for designing broad-band microstrip antennas in multilayered planar structures”, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 47, pp. 1416 – 1420, 1999.
- [11] Lee Choon Sae y Nalbandian Vahakn, “Impedance matching of a dual-frequency microstrip antenna with an air gap”, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 41, pp. 680 – 682, 1993.
- [12] Stutzman W.L. y Thiele G.A., Antenna Theory and Design, John Wiley & Sons, 2<sup>nd</sup> ed., New York, 664 p., 1998.
- [13] Saunders S.R., Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, John Wiley & Sons, 426 p., 1999.

- [14] Milligan, Thomas A., Modern antenna design, John Wiley and Sons Inc., 2nd ed., New York, 614 p., 2005.
- [15] Carver K. R. y Mink J. W, "Microstrip Antennas technology", IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 29, pp. 2-24, 1981.
- [16] Windlin Martin, Microstrip Patch Antenna at 10.5 GHz for Automobile Obstacle Detection, CICESE, Tesis de maestría, 2005.
- [17] Rodolfo Neri Vela, Lineas de Transmision, McGraw-Hill.,1999.
- [18] Constantine A. Balanis., Antenna Theory, Analysis And Design., Tercera Ed, John Wiley y Sons., 2005.
- [19] Rajesh Kumar, Dr. D. C. Dhubkarya, Design and Analysis of Circular Ring Microstrip Antenna, H.O.D, Deptt.of E&C Engg. B.I.E.T, Member IEEE, Asstt. Professor, SIT., 2011
- [20] J. R. James and P. S. Hall (Editors), Handbook of microstrip antennas, vol. 28, pp. 169-183, 1989.
- [21] Chew W. C (1982) 'A Broad-Band Annular-Ring Microstrip Antenna' IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP-30, No. 5, pp. 918-922.
- [22] David M. Kokotoff, James T. Aberle and Rod B. Waterhouse (1999) 'Rigorous Analysis of Probe-Fed Printed Annular Ring Antennas' IEEE Trans. on Antenna and Propagation, Vol. 47, No.2, pp 384-388.
- [23] Garg R, Bhartia P, Bahl I and Ittipiboon A (2001)'Microstrip Antenna Design Handbook' ArtechHouse, Bostan, London.]. [Rajesh Kumar, Dr. D. C. Dhubkarya, Design and Analysis of Circular Ring Microstrip Antenna, H.O.D, Deptt.of E&C Engg. B.I.E.T, Member IEEE, Asstt. Professor, SIT., 2011.
- [24] Buenrostro Rocha Sergio, Metodología para el diseño y construcción de una antena microcinta en la banda de wimax a 3,5 GHz, Tijuana-Mexico, 2007, Trabajo de grado (Maestro en ciencias), Instituto Politécnico Nacional.
- [25] WHEELER H.A.. Transmission line properties of a strip on dielectric sheet on a plane. IEEE MTT. 25(8). Pp. 631-647. 1977
- [26] Zurcher, Jean Francois y Gardiol, Fred E., Broadband patch antennas, Artech House, 1st. Ed., New York, 209 p., 1995
- [27] SOPHOCLES J. Orfanidis, Electromagnetic Waves and Antennas, Rutgers University, 1 st ed., 819 p., 2004.
- [28] Wolfram. (s.f.). *Sitio web de Wolfram Mathematica 9*. Recuperado el 6 de Agosto de 2013, de <http://www.wolfram.com/mathematica/>

[29] Milligan, Thomas A., Modern antenna desing, JohnWiley and Sons Inc., 2nd ed., New York, 614 p., 2005.

[29] *Sitio web de Rogers Corporation*. Recuperado el 6 de Agosto de 2013, de <http://www.rogerscorp.com/>

[30] LVDAM-ANT® - Software, "Lab-Volt – Antenna Training and Measuring System (8092)".

Available:<http://www.labvolt.com/products/telecommunications/antennas/antenna-training-and-measuring-system-8092>.

[31] Hammerstad E. y O. Jensen, Accurate models for microstrip computer aided design., IEEE Microwave Syposium Digest, pp. 407-409, 1980.