

**ANÁLISIS TEÓRICO DEL PUNTO DE ALIMENTACIÓN DE UNA ANTENA
PARCHE Y SIMULACIONES NUMÉRICAS E IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA**

MIGUEL ÁNGEL PARRA CASTILLO

CARLOS DAVID SALAZAR SALAS



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS

**ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES**

BUCARAMANGA

2016

**ANÁLISIS TEÓRICO DEL PUNTO DE ALIMENTACIÓN DE UNA ANTENA
PARCHE Y SIMULACIONES NUMÉRICAS E IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA**

MIGUEL ÁNGEL PARRA CASTILLO

CARLOS DAVID SALAZAR SALAS

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Electrónico**

Director

ERNESTO AGUILERA BERMUDEZ

Ingeniero Electrónico, Ph.D

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS

**ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES**

BUCARAMANGA

2016

Dedicamos esta tesis a nuestros familiares

AGRADECIMIENTOS MIGUEL

En el trayecto de la vida, muchas personas, con o sin conocimiento, aportan a la formación de una persona. Por esto quiero agradecer a aquellos que comenzaron mi formación e incondicionalmente siempre estuvieron presentes en cada objetivo alcanzado, a Miguel Francisco Parra, un docente ejemplar sobre la ética, el trabajo y la responsabilidad social como individuo, a María Gloria Esperanza Castillo, que con su afecto total y desinteresado, me ayudo a comprender que la vida sin amor es vacía y que la pasión es capaz de batir cualquier obstáculo, a mis hermanos que sin darse cuenta se convirtieron en modelos de responsabilidad, como mi hermana Johanna, de superación y esfuerzo, como mi hermano Juan Carlos y finalmente agradezco a mi hermana Silvia por enseñarme a ver lo jocoso de la vida.

Al amigo, o mejor, hermano Yuldor, agradezco su compañía, motivación y confidencialidad.

También me gustaría agradecer a los acompañantes que fueron apareciendo en las diferentes etapas, a mis compañeros del colegio INEM que demuestran que un colegio público es más rico, en el sentido más importante, que cualquier otra entidad privada. Y durante mi vida universitaria agradezco a Gerson por enseñarme como no se debe jugar fútbol-sala, a Selim, Andrés, Jose, Diego, Roy, Milena, David, Anjher, Hernando, Wilmer, entre otros compañero que junto a mi compartieron este proceso de crecimiento académico.

Agradezco a Cuentero por mostrarme que, el sistema de valoración académica no representa en lo más mínimo la capacidad o el compromiso de una persona, y que cada cosa que se presenta en la vida puede ser tomada de forma positiva.

A la compañía más importante durante mi ciclo universitario, a esa persona que sirvió como un soporte y que por fuera de cualquier límite, ella es lo mejor pudo dejar este ciclo en mí.

A Efren por sus recomendaciones y ayudas, también agradezco.

Finalmente agradezco a mi director de proyecto de grado, Ernesto Aguilera, por aportar de forma contundente en la finalización de este proyecto de vida.

AGRADECIMIENTOS CARLOS

En primer lugar a Dios por permitirme llegar hasta este punto de mi vida, por ser mi apoyo y mi fortaleza.

A mi Padres Elizabeth Salas Moreno y Juan Carlos Salazar Esteban porque a lo largo de mi vida me han acompañado y apoyado, por ser mi ejemplo de vida y principalmente por ser un apoyo incondicional durante mi preparación profesional.

A mi novia Marly Viviana Velásquez Villar por ser mi amiga, confidente y principalmente por brindarme amor y cariño a lo largo de estos años.

A mi colega de proyecto de grado Miguel Ángel Parra Castillo por mi ser compañero de estudio y por compartir este sueño, la realización de nuestro proyecto de grado.

Al director del proyecto Ernesto Aguilera Bermude por ser nuestro guía y mentor en el desarrollo de este proyecto.

Gracias a todos.

Carlos David Salazar Salas

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	18
2. OBJETIVOS.....	20
2.1. OBJETIVO GENERAL	20
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3. TEORIA BÁSICA DE ANTENAS TIPO PARCHE	21
3.1. ANTENAS PARCHE	21
3.2. MODELOS CIRCUITALES DE ANTENAS PARCHE	22
3.2.1. Alimentación por cable o sonda coaxial	23
3.2.2. Alimentación por línea de microcinta	24
3.2.3. Alimentación mediante acoplamiento por apertura	25
3.2.4. Alimentación mediante acoplamiento por proximidad.....	25
3.3. IMPEDANCIA DE ENTRADA.....	26
3.4. FACTOR DE CALIDAD Y ANCHO DE BANDA.....	28

3.5.	PATRÓN DE RADIACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTE	32
4.	SIMULACIONES, MODELOS MATEMÁTICOS Y MEDICIONES	34
4.1.	INTRODUCCIÓN	34
4.2.	ESTUDIO PRELIMINAR DEL SIMULADOR Y EL MODELO MATEMÁTICO	35
4.2.1.	Carta de Smith para dos métodos de simulación y modelo teórico	35
4.2.2.	Lóbulos de radiación obtenidos en CST	37
4.2.3.	Comprobación de los resultados expuestos por Güney	40
4.3.	DIMENSIONES DE LA ANTENA DE ESTUDIO	42
4.4.	SIMULACIONES EN CST, IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO EN MATLAB® Y MEDICIONES EN VNA	44
4.4.1.	Impedancia de entrada en CST, modelo matemático y medidas del VNA para tres puntos de alimentación	44
4.4.2.	Lóbulos de radiación y densidad de corriente para tres puntos de alimentación	47

4.4.3.	Impedancia de entrada y lóbulos radiación de los puntos restantes	49
4.4.4.	Parámetro S11.....	56
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	61
5.1.	EL ESTUDIO PRELIMINAR	61
5.2.	ANÁLISIS DE RESULTADOS COMPUTACIONALES Y MEDIDAS DEL VNA	62
6.	CONCLUSIONES	64
7.	BIBLIOGRAFIA	65
	ANEXOS	66

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Dimensiones de una antena parche.....	22
Figura 2. Modelo circuital aproximado de una antena parche alimentado por: a) sonda coaxial, b) línea de microcinta, c) acoplamiento por apertura, d) acoplamiento por proximidad.	23
Figura 3. Corte transversal sobre una antena parche con alimentación directa	24
Figura 4. Antena parche alimentada por microcinta.	24
Figura 5. Antena parche alimentada mediante acoplamiento por apertura.	25
Figura 6. Antena parche alimentada mediante acoplamiento por proximidad. .	26
Figura 7. Punto de alimentación a una distancia “x” del borde del parche.	27
Figura 8. Grafica del coeficiente de reflexión (S_{11}) en la entrada de una antena alimentada mediante un solo puerto.	28
Figura 9. Carta de Smith. Circulo negro: ROE=2; circulo azul: coeficiente de reflexión de la antena (S_{11}).	29
Figura 10. Dimensiones de una antena parche con alimentación coaxial.	30
Figura 11. Control del factor de calidad. Fuente: Tomado de López, G., 2013	32
Figura 12. a) Distribución de corriente típica de una antena parche simulada con el software CST. Patrón de radiación en 3D para: b) vista lateral y c) vista superior).	33
Figura 13. Puntos de alimentación sobre el parche radiante.	34
Figura 14. Carta de Smith en CST para: a) Método 1, b) Método 2. Frecuencia 4.15 – 4.65 GHz	36
Figura 15. Gráfica realizada en Matlab	36
Figura 16. a) y c) Lóbulo de radiación manteniendo constante $\Phi=90^\circ$ y $\Theta=90^\circ$ respectivamente, Método 1. b) y d) Lóbulo de radiación manteniendo constante $\Phi=90^\circ$ y $\Theta=90^\circ$ respectivamente, Método 2.	37
Figura 17. Lóbulo de radiación en 3D	38
Figura 18. a) y c) Lóbulo de radiación manteniendo constante $\Phi=90^\circ$ y $\Theta=90^\circ$ respectivamente. b) y d) Lóbulo de radiación manteniendo constante $\Phi=90^\circ$ y $\Theta=90^\circ$ respectivamente.....	39
Figura 19. a) y b) Lóbulo de radiación en 3D, Método 1 y 2 respectivamente ..	40
Figura 20. Carta de Smith para: a) Caso 1, b) Caso 2, c) Caso 3, d) Caso 4 ...	42
Figura 21. Carta de Smith para el punto de alimentación en la posición (1). a) CST, b) VNA y c) Modelo matemático.	45
Figura 22. Carta de Smith para el punto de alimentación en la posición (2).....	46
Figura 23. Carta de Smith para el punto de alimentación en la posición (3).....	46
Figura 24. Lóbulos de radiación de los puntos (1), (2) y (3) para: a) $\Theta=90^\circ$, b) $\Phi=180^\circ$	47

Figura 25. Distribuciones de corriente y lóbulos de radiación para: a) punto (1), b) punto (2), c) punto en (3).	48
Figura 26. Impedancia de entrada para el punto 4.....	49
Figura 27. Impedancia de entrada para el punto 5.....	50
Figura 28. Impedancia de entrada para el punto 6.....	50
Figura 29. Lóbulos de radiación de los puntos (4), (5) y (6) para: a) Theta=90°, b) Phi=180°.....	51
Figura 30. Distribución de corriente y lóbulo de radiación para: a) Punto (4), b) Punto (5), c) Punto (6)	52
Figura 31. Impedancia de entrada para el punto 7.....	53
Figura 32. Impedancia de entrada para el punto 8.....	53
Figura 33. Impedancia de entrada para el punto 9.....	54
Figura 34. Lóbulos de radiación de los puntos (7), (8) y (9) para: a) Theta=90°, b) Phi=180°. Fuente: Autores.....	54
Figura 35 Distribución de corriente y lóbulo de radiación para: a) Punto (7), b) Punto (8), c) Punto (9).	55
Figura 36. Parámetro S11 para el punto 1.	56
Figura 37. Parámetro S11 para el punto 2.	57
Figura 38. Parámetro S11 para el punto 3.	57
Figura 39. Parámetro S11 para el punto 4.	58
Figura 40. Parámetro S11 para el punto 5.	58
Figura 41. Parámetro S11 para el punto 6.	59
Figura 42. Parámetro S11 para el punto 7.	59
Figura 43. Parámetro S11 para el punto 8.	60
Figura 44. Parámetro S11 para el punto 9.	60
Figura 45. Resultados agrupados del Modelo matemático y los métodos de simulación.....	61
Figura 46. Comparación del parámetro S11 para los puntos 1 y 9.....	62

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Dimensiones de las antenas tipo parche para cuatro casos.....	41
Tabla 2. Posición de los puntos de alimentación.	43
Tabla 3. Dimensiones y características del parche de prueba.	67

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Proceso de simulación numérico en CST.....	65
ANEXO B. Implementación.....	69

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS TEÓRICO DEL PUNTO DE ALIMENTACIÓN DE UNA ANTENA PARCHE Y SIMULACIONES NUMÉRICAS E IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA •

AUTORES: MIGUEL ANGEL PARRA CASTILLO & CARLOS DAVID SALAZAR SALAS**

PALABRAS CLAVE: Antena parche, alimentación coaxial, coeficiente de reflexión.

DESCRIPCIÓN: En este trabajo se encuentra una recopilación básica de la teoría de antenas y teoría referente a antenas tipo parche alimentadas por cable coaxial o alimentación directa.

Estas ecuaciones encontradas, se implementan con el objetivo de observar el comportamiento de la impedancia de entrada de la antena para puntos de alimentación sobre la línea central del parche además se comparan estos resultados con los resultados obtenidos por otros autores.

Para corroborar el modelo de simulación a utilizar, se podrán encontrar diferentes modelos, a los cuales se les variará algunos parámetros para fundamentar la selección de un modelo de simulación, el cual será diseñado en el programa CST STUDIO SUITE 2015 y a partir de este se contrarrestan con los resultados expuestos por la teoría.

Ya con el modelo de simulación seleccionado, se plantean 9 puntos de alimentación independientes sobre un cuadrante del parche radiante. Se establecen las dimensiones de la antena para extraer de las simulaciones los valores y representaciones de la impedancia de entrada de la antena, los lóbulos de radiación y sus respectivas distribuciones de corrientes.

Estas antenas son implementadas y se extraen, de un dispositivo de medición, los valores que hacen referencia al coeficiente de reflexión (S_{11}) e impedancias de entrada, con el objetivo de comparar los resultados arrojados por las ecuaciones teóricas de impedancia, las simulaciones e implementaciones prácticas. Finalmente se podrá encontrar un análisis de estos resultados y las conclusiones de este trabajo.

• Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Ernesto Aguilera Bermúdez.

ABSTRACT

TITLE: THEORETICAL ANALYSIS POINT FEED OF A PATCH ANTENNA AND NUMERICAL SIMULATIONS AND PRACTICAL IMPLEMENTATION *

AUTHORS: Miguel Ángel Parra Castillo & Carlos David Salazar Salas**

KEYWORDS: Patch antenna, Coaxial feed, reflection coefficient.

DESCRIPTION: In this paper-document you will find a basic collection of antenna theory and theory concerning to antennas type patch powered by coaxial cable or direct.

These equations that have been found are implemented to observe the behavior of the input impedance of the antennas, for points powered over the central-line of the path and the results are compared with the results obtained by other authors.

To corroborate the simulation model used, It's possible find different models, that will be varying in different parameters to support the selection of a simulation model, This model will be designed in the CST STUDIO SUITE 2015 program and from this are counteracted with the results reported by the theory.

And with the selected simulation model, 9 points of independent source are proposed over a quadrant radiating patch, establishing the dimensions of the antenna to extract values from these simulations and representations of the input impedance of the antenna lobes radiation and their respective current distributions.

These antennas are implemented, and the values that make reference to the reflection coefficient (S11) and input impedances are obtained from a measuring device, to compare the results obtained from theoretical equations impedance, simulations and practical implementations . Finally, you can find a discussion of these results and conclusions of this job.

* Degree Work

** Faculty of Physic Mechanical Engineering. School of Electric, Electronic and Telecommunications. Director: PhD. Ernesto Aguilera Bermúdez.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia de las telecomunicaciones se ha visto un crecimiento asociado de la tecnología, uno de los mayores logros ha sido el descubrimiento y uso de las ondas electromagnéticas para envío y recepción de información, utilizando como medio de propagación el espacio libre, gracias a la invención y diseño de dispositivos como las antenas que transforman la energía eléctrica en ondas electromagnéticas.

Las antenas se convierten en un tema importante de investigación buscando optimizar parámetros característicos como la impedancia de entrada, factor de calidad, frecuencia de trabajo, ancho de banda, directividad, ganancia, potencia de operación y una óptima polarización; según la aplicación es posible manipular estas variables las cuales a su vez dan origen a diversos tipos de antenas.

Dentro de la variedad de antenas se encuentran unas que se caracterizan por ser de tamaño reducido, llamadas “antenas Microstrip” o antenas tipo parche, por esta característica y por el crecimiento de aplicaciones en sistemas de comunicación, el análisis de este tipo de antenas se ha convertido en un asunto de investigación.

Para verificar el diseño de una antena se puede utilizar herramientas de simulación que han surgido gracias a la tecnología informática que desarrolla software con altos niveles de precisión, estos software son comerciales en la actualidad, por ejemplo HFSS Ansoft (high frequency structural simulator), IE3D Zelanda o CST (Computer Simulación Technology), estos simuladores prestan un amplio servicio en pruebas realizadas a diseños de antenas antes de su fabricación y pruebas prácticas, con el objetivo de encontrar fallas en el diseño o por el contrario, dar como terminado y concluir que tan eficiente es.

Los diseños de antenas van de la mano de la aplicación a desarrollar, teniendo como tendencia la miniaturización de estas. Analizando la antena tipo parche de microcinta (microstrip patch antenna), llama la atención por sus características y por su tamaño (Pattnaik et al., 1998), a su vez tiene una fácil fabricación y amplias aplicaciones que van desde la medicina hasta comunicaciones inalámbricas (Singh and Singh, 2012), para este tipo de antenas han surgido muchas técnicas para la optimización de sus características (Sanchez and Robertson 1996) llegando a métodos que se centran en técnicas de alimentación de la antena que aumentan el funcionamiento en la transmisión de energía electromagnética.

Una técnica de alimentación es por cable o sonda coaxial, la principal ventaja de este método es que el cable coaxial se puede colocar en cualquier ubicación deseada en el parche con el fin de que coincida la impedancia del cable con la impedancia de entrada de la antena, esto significa que las características de la antena se modifican según el punto de alimentación, sin embargo no escoger un

punto adecuado trae desventajas proporcionando un ancho de banda estrecho. Otro problema es modelar un agujero que perfora el sustrato para que el conector sobresalga del plano de tierra, por tanto, el acople no es completamente uniforme para sustratos gruesos ($h > 0.02\lambda_0$). También, para los sustratos más gruesos, el aumento de la longitud de la sonda hace que la impedancia de entrada sea más inductiva (Singh and Singh, 2012).

Se pretende realizar pruebas a antenas tipo parche con la técnica de alimentación mencionada en el párrafo anterior. Variando el punto de alimentación sobre el parche se analizará el comportamiento de la distribución de corrientes, lóbulos de radiación e impedancia de entrada. Esta labor se realiza con simulaciones mediante el software CST (Computer Simulación Technology), con el fin de analizar el comportamiento de algunas características (Coeficiente de reflexión e impedancia de entrada) y comparar estos resultados con prácticas realizadas en el laboratorio a antenas físicas, intentando obtener la mayor exactitud en la ubicación de los diferentes puntos de alimentación simulados.

El análisis de los resultados muestra las zonas de la antena con mayor eficiencia según la ubicación del punto de alimentación, esto es de importancia, pues se puede aprovechar al máximo una antena tipo parche simplemente con la modificación de este.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio acerca de la modificación de algunas características (distribución de corriente y lóbulo de radiación) y parámetros (impedancia de entrada, directividad y eficiencia) en una antena parche típica de acuerdo al lugar de alimentación mediante el contacto directo con el cable coaxial.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcanzar el objetivo general los siguientes objetivos serán necesarios

- Revisión bibliográfica de antenas tipo parche.
- Analizar, mediante simulación, el comportamiento de los parámetros (impedancia de entrada, directividad y eficiencia) de una antena caracterizada con anterioridad, cuando se modifica la posición del punto de alimentación por medio de sonda o cable coaxial.
- Implementar una antena parche anteriormente seleccionada en diferentes PCB's, con el fin de analizar la variación de los parámetros (impedancia de entrada, directividad y eficiencia) y características (distribución de corriente y lóbulo de radiación) al modificar la posición del punto de alimentación por sonda o cable coaxial.
- Comparar los resultados obtenidos de las simulaciones y de la implementación.

2. TEORIA BÁSICA DE ANTENAS TIPO PARCHE

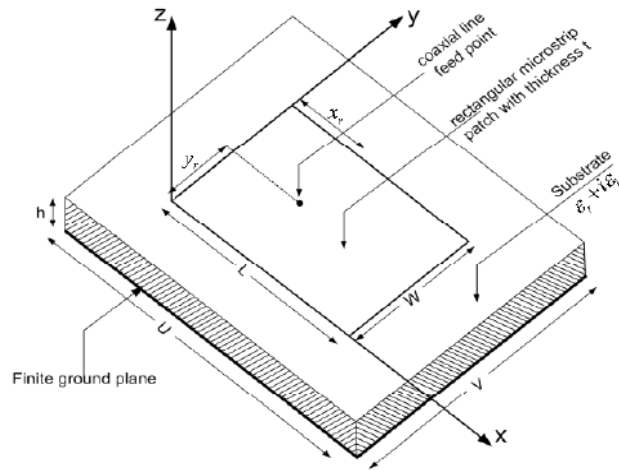
Según el instituto de ingeniería eléctrica y electrónica, se define una “antena como aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas” (IEEE Std 145-1983). Las antenas no tienen una forma definida, pero comparten una característica esencial, pues ellas son el fin del recorrido de una onda en un medio guiado y el inicio de esta al espacio libre, o de forma inversa. Los diferentes parámetros que caracterizan una antena: patrón, directividad, ancho de banda, resistencia de radiación, longitud efectiva, impedancia de entrada, determinan el comportamiento y el funcionamiento y su gama de aplicaciones.

Para utilizar una antena como elemento de un sistema de comunicación hay que tener en cuenta las condiciones del problema a enfrentar, por lo tanto se hace necesario definir ciertos parámetros que permitan evaluar y describir el efecto de la antena sobre el sistema a implementar. Por ejemplo, para sistemas de comunicación de largas distancias a bajas frecuencias se necesita una antena diferente que para un sistema de comunicación de cortas distancias a altas frecuencias (Cardama et al, 1999). Es decir, si se desea realizar la recepción de señales de televisión (50 MHz a 86 MHz), comúnmente se utiliza la antena Yagi de alrededor de un metro de longitud, lo que contrasta con la antena de aproximadamente 11 centímetros que se utilizaría para realizar una conexión de red de área local (WiFi – 2.4GHz).

2.1. ANTENAS PARCHE

En la Figura 1 se observa una antena microstrip básica. Esta antena se basa en un fino parche conductor de dimensiones (W,L) que está impreso sobre un sustrato dieléctrico de altura (h) y permitividad relativa (ϵ_r) , un plano de masa por debajo del dieléctrico y un puerto de alimentación.

Figura 1. Dimensiones de una antena parche.



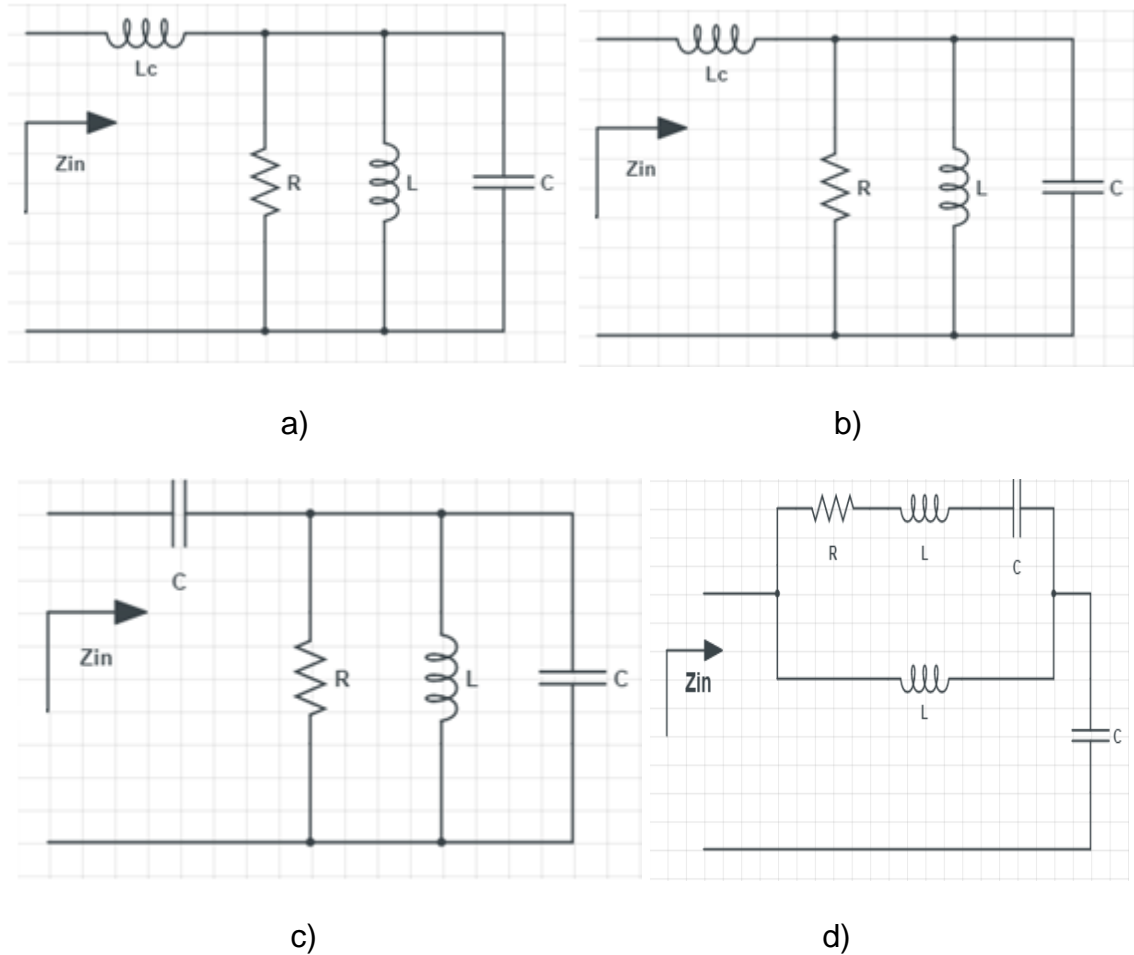
Fuente: Tomado de Balanis, A., 2005.

Existen varias técnicas disponibles para alimentar o transmitir energía electromagnética a una antena tipo parche. La alimentación es muy importante para un funcionamiento eficiente de la antena y mejorar la impedancia de entrada de esta, una de estas técnicas es la alimentación directa por cable o sonda coaxial, diferente a lo comúnmente utilizado que es la alimentación por microcinta. Los diferentes métodos de alimentación se exponen con mayor detalle en la sección 3.2.

2.2. MODELOS CIRCUITALES DE ANTENAS PARCHÉ

Existen diferentes métodos de alimentación para una antena parche, como lo son por cable o sonda coaxial, por línea de microcinta, mediante acoplamiento por proximidad y mediante acoplamiento por apertura, cada uno de estos métodos tiene un modelo circuital con el cual se pueden representar. A continuación se muestran cada uno de estos modelos (Singh and Singh, 2012):

Figura 2. Modelo circuital aproximado de una antena parche alimentado por: a) sonda coaxial, b) línea de microcinta, c) acoplamiento por apertura, d) acoplamiento por proximidad.

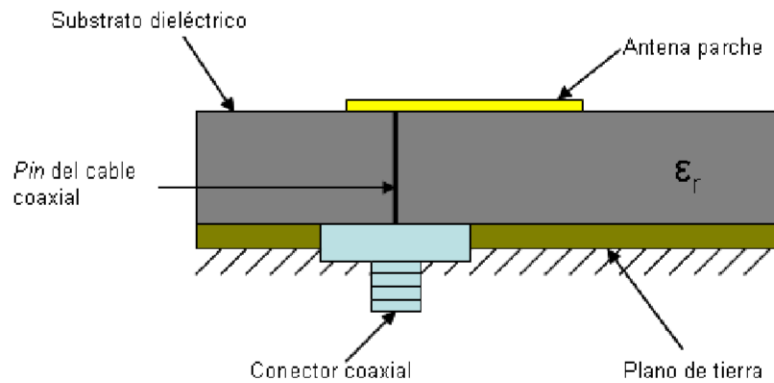


2.2.1. Alimentación por cable o sonda coaxial. Un modelo circuital aproximado, para un parche con W y L iguales y alimentado por un cable o sonda coaxial como se observa en la Figura 3, puede ser representado por un circuito RLC resonante en serie con una inductancia aportada por la línea de alimentación del parche, como se observa en la Figura 2 a).

En este tipo de alimentación directa por cable coaxial, el conductor interior del cable coaxial se extiende a través del dieléctrico y está unido al parche metálico radiante, mientras que el conductor exterior está conectado al plano de tierra. La principal ventaja de este esquema de alimentación es que la alimentación se puede colocar en cualquier ubicación deseada en el parche. Este método tiene baja radiación espuria. Sin embargo, su principal desventaja es que proporciona un ancho de banda estrecho y es difícil modelar un agujero que perfora el sustrato y que el conector sobresalga fuera del plano de tierra, por tanto, hace que el parche no quede completamente plano para sustratos delgados ($h >$

0.02 λ). También, para los sustratos más gruesos, el aumento de la longitud de la sonda hace que la impedancia de entrada sea más inductiva, y esto conduce a problemas de adaptación de impedancia (Singh and Singh, 2012).

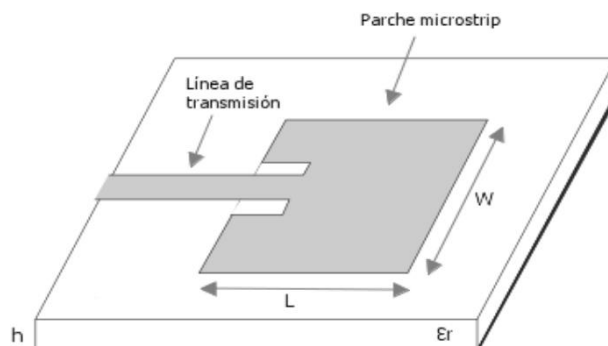
Figura 3. Corte transversal sobre una antena parche con alimentación directa



. Fuente: Tomado de Balanis, A., 2005.

2.2.2. Alimentación por línea de microcinta. Esta alimentación consiste en una línea de microcinta con las mismas características del parche pero mucho más delgado como se observa en la Figura 4. Existe facilidad tanto en su fabricación como en adaptación de impedancia. Una desventaja existente en este tipo de alimentación es que a medida que se aumenta el grosor del sustrato, aumenta la radiación espuria y la potencia a radiar queda atrapada dentro del sustrato, esta desventaja limita el ancho de banda y sus diseños prácticos. También tiene una representación circuital similar a la técnica de alimentación anterior como se observa en la Figura 2 b).

Figura 4. Antena parche alimentada por microcinta.

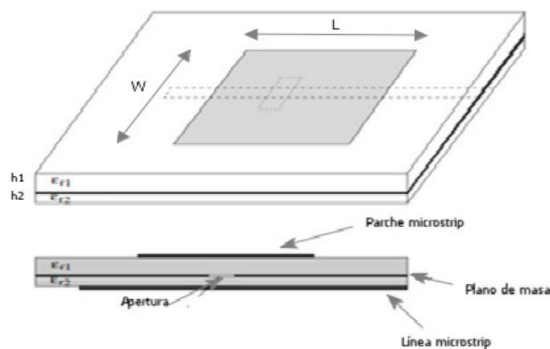


Fuente: Tomado de López, G., 2013.

2.2.3. Alimentación mediante acoplamiento por apertura. El acoplamiento por apertura se fundamenta de dos sustratos, estos están separados por un plano de tierra con una apertura como se observa en la Figura 5. El primer sustrato contiene en la parte superior el parche radiante, además debe ser el sustrato más grueso pero con constante dieléctrica más baja, enseguida está el plano de tierra, esta debe tener una ranura. El segundo sustrato debe ser más delgado pero con constante dieléctrica más alta, en la parte inferior de este se encuentra impresa la línea de microcinta. Este método de tiene ancho de banda bajo, pero radiación espuria baja.

La representación circuital para este método de alimentación se puede observar en la figura 2 c).

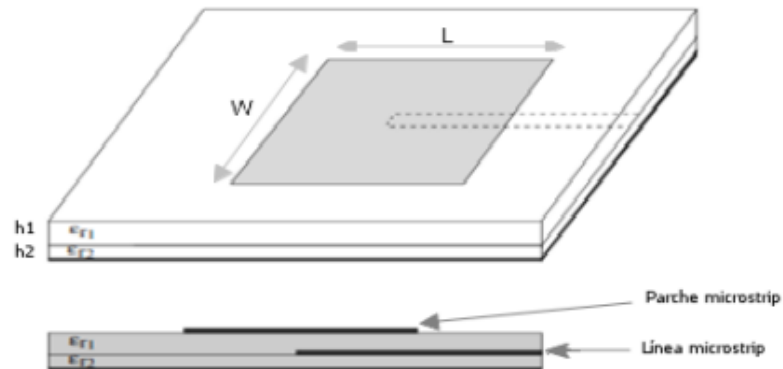
Figura 5. Antena parche alimentada mediante acoplamiento por apertura.



Fuente: Tomado de López, G., 2013.

2.2.4. Alimentación mediante acoplamiento por proximidad. La técnica de alimentación mediante acoplamiento por proximidad consiste en una línea de microcinta en medio de dos sustratos, como se observa en la Figura 6, el sustrato superior es más grueso que el inferior. En la parte superior del sustrato inferior debe estar impresa la línea de microcinta, y en la parte inferior de este mismo se encuentra el plano de tierra. Una ventaja de este tipo de alimentación es la facilidad de adaptar el diseño debido a que el parche y la línea de transmisión se ubican en distintos sustratos.

Figura 6. Antena parche alimentada mediante acoplamiento por proximidad.



Fuente: Tomado de López, G., 2013

Para esta técnica de alimentación, el modelo circuital se muestra en la Figura 2 d).

2.3. IMPEDANCIA DE ENTRADA

La impedancia de entrada de un circuito RLC en paralelo está definida como se muestra en la segunda parte de la siguiente Ecuación 1, mientras que la primera parte hace referencia a la inductancia que aporta la línea de alimentación.

$$Z_{in} = j\omega L_1 + \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C \right)^{-1} \quad (1)$$

La Ecuación 1 se puede expresar en función de la frecuencia y algunos parámetros de la antena:

$$Z(f) = \frac{R}{1+Q_T^2 \left[\frac{f}{f_r} - \frac{f_r}{f} \right]^2} - j \left\{ \frac{RQ_T \left[\frac{f}{f_r} - \frac{f_r}{f} \right]}{1+Q_T^2 \left[\frac{f}{f_r} - \frac{f_r}{f} \right]^2} \right\} + Z_{coax} \quad (2)$$

Donde R es la resistencia de resonancia del circuito resonante paralelo RLC, Q_T es el factor de calidad total asociado con el sistema de pérdidas incluyendo la radiación y las pérdidas asociadas con la propagación de ondas de superficie sobre un conductor recubierto con dieléctrico.

f_r es la frecuencia de resonancia de un circuito RLC paralelo dada por:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

La impedancia de la línea de alimentación se da mediante:

$$Z_{\text{coax}} = 60 \left[(k_0 h)^2 \sqrt{\epsilon_r} + j k_0 h \arcsin \left(\frac{2h}{r_0} \right) + \frac{r_0 - (r_0^2 + 4h^2)^{1/2}}{2h} \right] \quad (4)$$

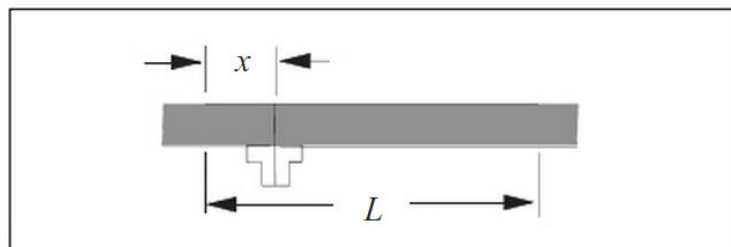
Donde r_0 es el radio interno del conductor $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 * \epsilon_0}$: que es la constante de propagación en el espacio libre, μ_0 y ϵ_0 son la permeabilidad y permitividad del espacio libre respectivamente (Güney, K., 1993).

Teniendo en cuenta el tipo de alimentación expuesto en la Figura 3 (Manteniendo constante $y_r = \frac{w}{2}$), para un punto de alimentación en el borde radiante, la impedancia de entrada es máxima, y para un punto de alimentación en el centro del parche, la impedancia de entrada es cero. Por lo tanto, la impedancia de entrada se puede controlar mediante el ajuste de la posición del punto de alimentación (Ammann, M., 1997). La variación de la impedancia de entrada como función de la posición del punto de alimentación en el parche se aproxima así:

$$Z_x = R_0 \cos^2 \left(\frac{\pi x}{L} \right) \quad (5)$$

Donde R_0 es la resistencia en el borde del parche y x es la distancia desde el borde como se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Punto de alimentación a una distancia "x" del borde del parche.



Fuente: Tomado de Ammann, M., 1997.

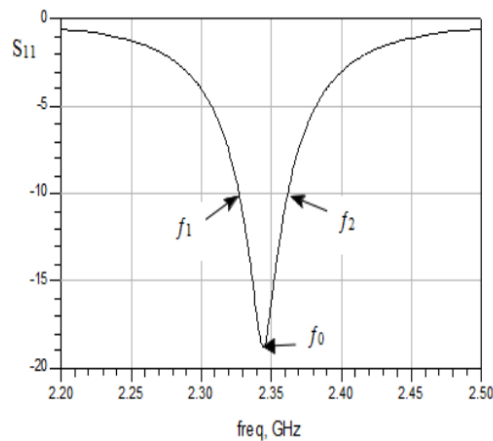
2.4. FACTOR DE CALIDAD Y ANCHO DE BANDA

Las antenas, en general, por su geometría, tiene unas bandas de frecuencias en las cuales su eficiencia es óptima, esta banda de frecuencias es llamada ancho de banda.

Dependiendo del parámetro del que se hable, la definición del ancho de banda varia, por lo tanto cuando se hable de ancho de banda en este documento se hará referencia únicamente al ancho de banda de impedancia.

En la Figura 8 se muestra el coeficiente de reflexión medido a la entrada de una antena en un rango de medida de 2.2 Ghz y 2.4 Ghz.

Figura 8. Grafica del coeficiente de reflexión (S_{11}) en la entrada de una antena alimentada mediante un solo puerto.



Fuente: Tomado de López, G., 2013

Teniendo en cuenta lo anterior se puede definir el ancho de banda de impedancia como la relación entre el margen de frecuencias en que se cumplen las especificaciones y la frecuencia central, es decir, el coeficiente de reflexión se suele definir al ancho de banda cuando es inferior a -10 dB, ya que estos valores garantizan que la potencia radiada será superior al 90%. El ancho de banda se puede obtener así:

$$Bw = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \quad (6)$$

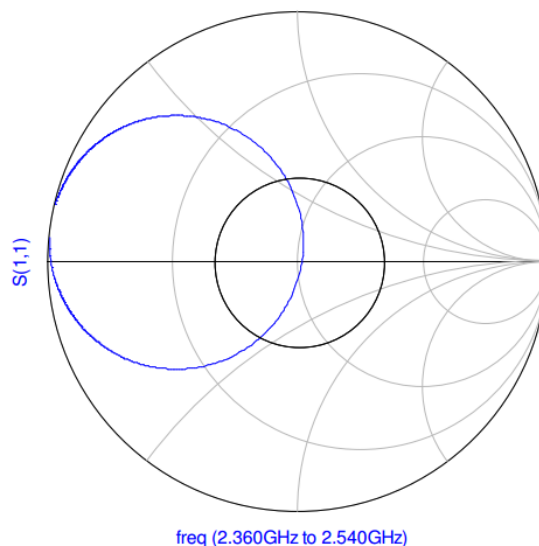
Donde f_2 y f_1 son las frecuencias en las que el coeficiente de reflexión (S_{11}) en la entrada de la antena tiene un valor determinado y f_0 es la frecuencia central.

Con ayuda de la carta de Smith el ancho de banda también se puede observar, según la relación de onda estacionaria (ROE) y el coeficiente de reflexión (S_{11}). Garantizando que el coeficiente de reflexión será menor a los -10 dB, lo que equivale a una $ROE < 2$ se aprecia en la Figura 9 el ancho de banda como el rango de frecuencias que se encuentran dentro del círculo $ROE < 2$.

La Ecuación 7 muestra la relación del ancho de banda (Bw) y el factor de calidad (Q_T) para estructuras resonantes, terminando el factor de calidad siendo inverso al ancho de banda.

$$Bw = \frac{f_2 - f_1}{f_0} = \frac{1}{Q_T} \quad (7)$$

Figura 9. Carta de Smith. Círculo negro: $ROE=2$; círculo azul: coeficiente de reflexión de la antena (S_{11}).



Fuente: Tomado de López, G., 2013

El factor de calidad (Q_T) es una medición que se obtiene de forma relativa, sin embargo del modelo aproximado se obtiene:

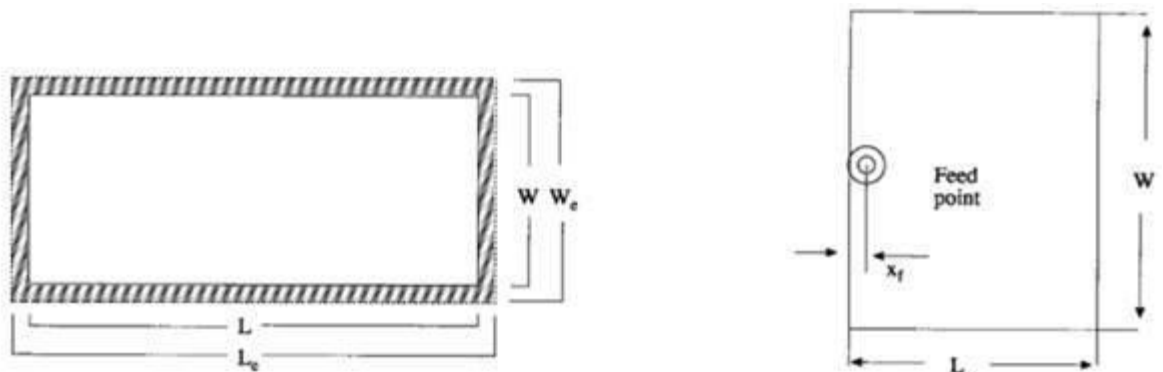
$$Q_T = 2\pi f_r RC \quad (8)$$

Siendo la capacitancia C de la TM_{10} transversal magnética de los modos de onda superficial (Carver, K., 1979):

$$C = \frac{\epsilon_e \epsilon_0 W_e L_e}{2h} \left(\cos \frac{\pi x_f}{L_e} \right)^{-2} \quad (9)$$

Donde x_f es el punto de alimentación, W_e y L_e (James, J., Hall, P., 1989) son dimensiones efectivas utilizadas en lugar de las dimensiones físicas W y L del parche y ϵ_e es la constante dieléctrica efectiva. W_e y L_e son usadas para tener en cuenta de manera efectiva la influencia de los campos de franja en los bordes, y la falta de homogeneidad dieléctrica de las antenas microstrip rectangulares con dieléctricos finos y gruesos. Esto se puede observar en la Figura 10 (Güney, K., 1993).

Figura 10. Dimensiones de una antena parche con alimentación coaxial.



Fuente: Tomado de Güney, K., 1993.

R es la resistencia de resonancia del circuito paralelo RLC:

$$R = R_r + R_d + R_c + R_s \quad (10)$$

En donde los cuatro términos representan la resistencia de radiación, la resistencia equivalente a las pérdidas dieléctricas, la resistencia equivalente a las pérdidas del cobre y la resistencia a la radiación de ondas superficiales, respectivamente, (Carver, K., 1979).

$$R_c = 000027 \sqrt{f_r} \frac{L}{W} Q_r^2 \quad (f_r \text{ en GHz}) \quad (11)$$

$$R_d = \frac{30 \tan \delta}{\epsilon_r} \frac{h \lambda_0}{LW} Q_r^2 \quad (12)$$

$$R_r = \frac{Q_r}{2\pi f_r C} \quad (13)$$

Siendo $\tan \delta$ la tangente de pérdidas del sustrato y Q_r es la calidad de la radiación dada en las siguientes ecuaciones:

$$Q_r = \frac{3}{16} \frac{\epsilon_e \lambda_0^2}{\eta Y_c h^2} \quad \text{para } W_{\text{equ}} < 0.35\lambda_0 \quad (14)$$

$$Q_r = \frac{\pi Y_c}{\frac{4\pi Y_c h}{\sqrt{\epsilon_e} \lambda_0} - \frac{1}{15\pi^2}} \quad \text{para } 0.35\lambda_0 \leq W_{\text{equ}} \leq 2\lambda_0 \quad (15)$$

$$Q_r = \frac{\sqrt{\epsilon_e} \lambda_0}{4} \frac{1}{h} \quad \text{para } 2\lambda_0 < W_{\text{equ}} \quad (16)$$

Donde $\eta = 120\pi$ ohm, $Y_c = 1/Z_c$ y $W_{\text{equ}} = 120\pi h / Z_c \epsilon_e$ (Güney, K., 1993).

Ahora para el cálculo de Z_c (impedancia característica del parche) para un valor dado de W/h , se usa la siguiente expresión (Gupta, K. C., Garg, R. and Gahl, I. J., 1979).

$$Z_c = \frac{\eta}{\sqrt{\epsilon_e}} \left[\frac{W}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W}{h} + 1.444 \right) \right]^{-1} \quad \text{para valores } (W/h \geq 1) \quad (17)$$

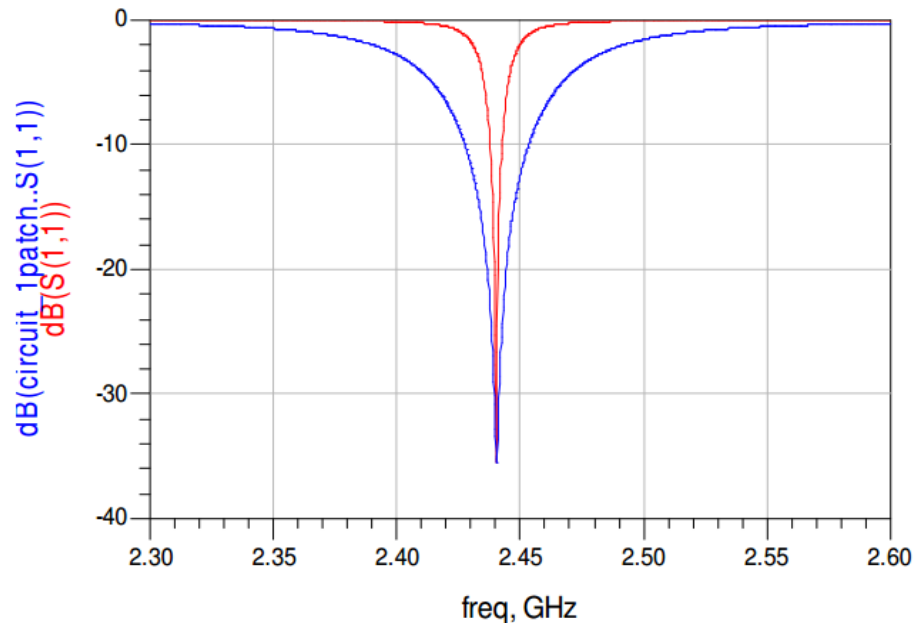
Utilizando la ecuación 3 y reemplazándola en 8 da como resultado final:

$$Q_T = \frac{RC}{\sqrt{LC}} \quad (18)$$

Con la ecuación anterior se puede observar que el factor de calidad es modificable, pues este depende de la resistencia R y el cociente C/L del modelo circuital. Al realizar esta acción, para una determinada impedancia de entrada, la relación LC y el valor R se deben mantener constantes, para garantizar la frecuencia de resonancia y la impedancia de entrada a esta frecuencia, respectivamente.

De este modo, en la Figura 11 y en correspondencia con la ecuación 18, se muestra como modificando el cociente C/L y manteniendo el producto LC constante se puede controlar el factor de calidad (Q_T) para la frecuencia de resonancia de la antena microstrip.

Figura 11. Control del factor de calidad.



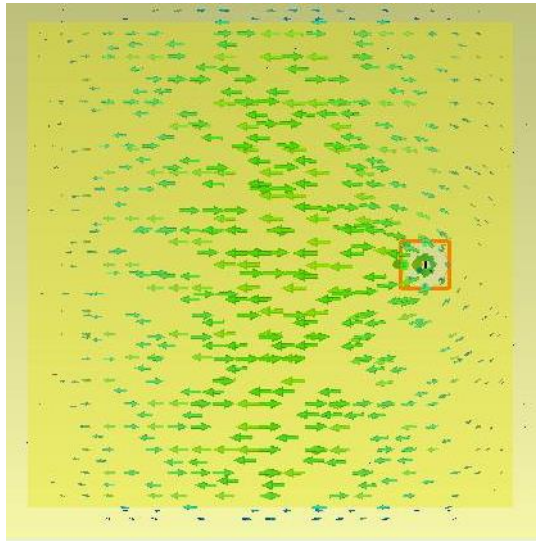
Fuente: Tomado de López, G., 2013

2.5. PATRÓN DE RADIACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTE

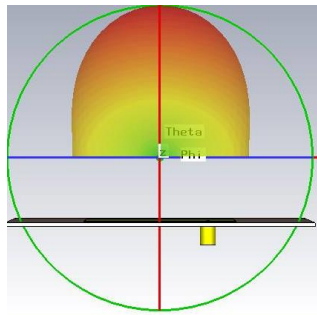
Al alimentar el parche radiante, se generan sobre la superficie de este una distribución de corrientes, esta distribución determina el patrón de radiación, además la distribución dependerá de la longitud que tenga la antena y del punto de alimentación de la misma. Una distribución típica de corriente de un parche alimentado por sonda o cable coaxial se muestra en la Figura 12 a). Así mismo, en la Figura 12 b) se aprecia el lóbulo de radiación asociado a esta misma distribución de corrientes. Cabe resaltar que a partir del análisis de los campos eléctricos de borde (*fringing fields*) es posible deducir expresiones que determinan la distribución energética en el lóbulo de radiación para una antena parche como se muestra en (Boualleg, A., Merabtine, N., 2005).

Un patrón de radiación es un una gráfica o un diagrama polar el cual simboliza las intensidades de los campos o las densidades de potencia. Este se traza en términos de la intensidad del campo eléctrico (E) o de la [densidad](#) de potencia (P). También se puede definir el patrón de radiación como “una función matemática o una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función de la dirección” (Balanis, A., 2005). En la realidad puede existir una radiación hacia la parte inferior de la antena debido a que el plano de tierra es de dimensiones finitas, sin embargo los lóbulos posteriores son en general pequeños comparados con el lóbulo principal.

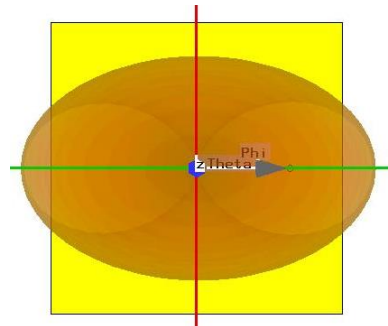
Figura 12. a) Distribución de corriente típica de una antena parche simulada con el software CST. Patrón de radiación en 3D para: b) vista lateral y c) vista superior).



a)



b)



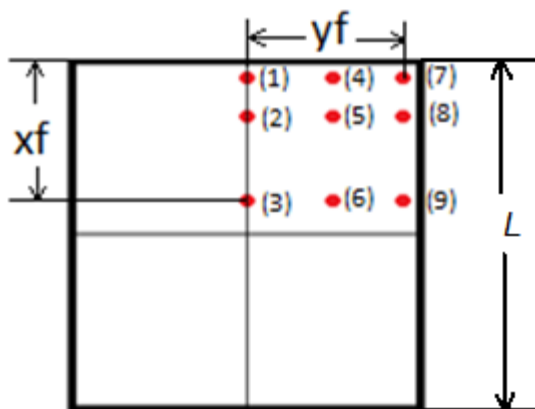
c)

3. SIMULACIONES, MODELOS MATEMÁTICOS Y MEDICIONES

3.1. INTRODUCCIÓN

En las diferentes actividades desarrolladas tanto en la ingeniería como en la investigación, sin distinción de las aplicaciones, es necesario corroborar y observar diversos parámetros del modelo predeterminado, con el propósito de establecer si se ajusta o no a las necesidades. Por esto es necesario utilizar software matemáticos especializados y/o modelos matemáticos en el tema a tratar, con el objetivo de realizar modificaciones en la estructura de forma fácil y económica. Se pueden variar los materiales a utilizar o su forma, asimismo estimar diferentes ambientes al cual podría estar expuesto el modelo. Para este trabajo, como primera medida, se realiza un estudio preliminar del simulador y el modelo matemático descrito en la sección 3.3. Además se modifica el punto de alimentación sobre un parche radiante en un cuadrante, como se detalla en la Figura 13, para mostrar los resultados en agrupaciones de tres puntos de alimentación. Las antenas implementadas se pueden ver en el Anexo B.

Figura 13. Puntos de alimentación sobre el parche radiante.



Para cada posición de alimentación mostrada en la Figura 13, se realizan pruebas independientes de los diferentes parámetros de antena bajo estudio, tanto en simulación como en las medidas con los elementos respectivos.

3.2. ESTUDIO PRELIMINAR DEL SIMULADOR Y EL MODELO MATEMÁTICO

De los dos métodos posibles mostrados en el Anexo A, con ayuda del simulador CST Studio, se pueden obtener las representaciones de la impedancia en la carta de Smith y su respectivo patrón de radiación para cada método. Estas simulaciones se realizan utilizando los valores dados en la Tabla 3, la cual se compara con el resultado mostrado en (Güney, K., 1993) para el caso 3.

Las condiciones de contorno (boundary condition) se seleccionaron abiertas (open (add space)) por lo cual la antena queda inmersa dentro del espacio computacional, más adelante se cambiarán estas condiciones para comparar resultados.

3.2.1. Carta de Smith para dos métodos de simulación y modelo teórico.

En la Figura 14 se presentan los resultados sobre la carta de Smith para un barrido de frecuencia entre 4.15 y 4.65 GHz. Al examinar los resultados que se muestran en (Güney, K., 1993) existe coherencia con los resultados obtenidos mediante el “Método 2” de simulación. Cabe resaltar que a medida que la longitud de la guía de onda aumenta o disminuye esta gráfica rota con respecto al centro de la carta de Smith, es decir, es posible situar la gráfica del “Método 1” en la misma posición de la gráfica del “Método 2” (Neri, R., 2004).

Lo anterior se compara con las ecuaciones usadas en la sección 3.3 con el objetivo de verificar, que tanto las simulaciones como los resultados teóricos concuerdan.

Con ayuda del software Matlab, se obtiene la Figura 15, que hace referencia a la impedancia de entrada sobre la carta de Smith utilizando los mismos parámetros de la tabla 3 (ver Anexo A) y las ecuaciones que se describen en (Güney, K., 1993). Este mismo procedimiento se realizó en la sección 4.2.3 para 4 de los casos expuestos en (Güney, K., 1993) comprobando el funcionamiento óptimo del código desarrollado.

Figura 14. Carta de Smith en CST para: a) Método 1, b) Método 2.
Frecuencia 4.15 – 4.65 GHz

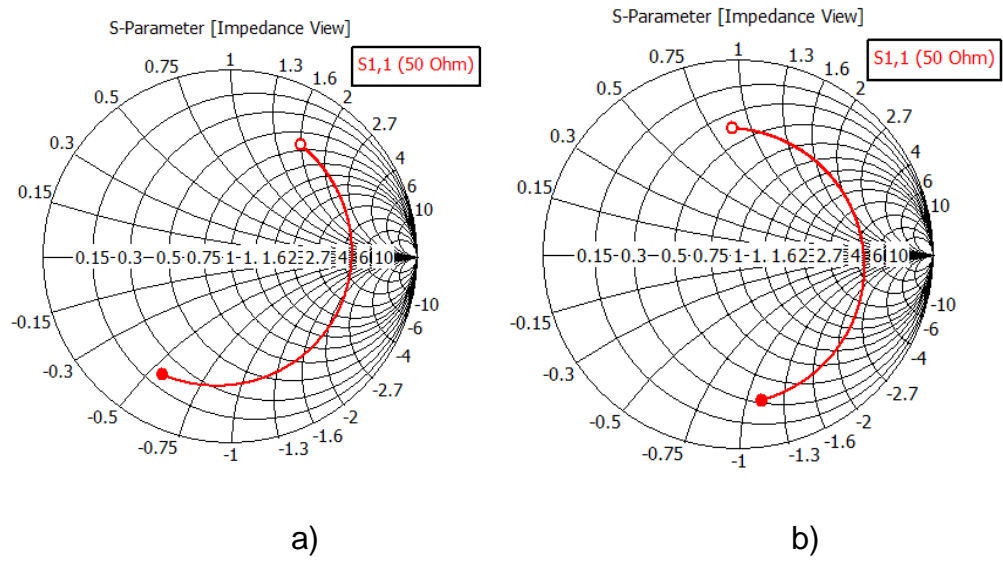
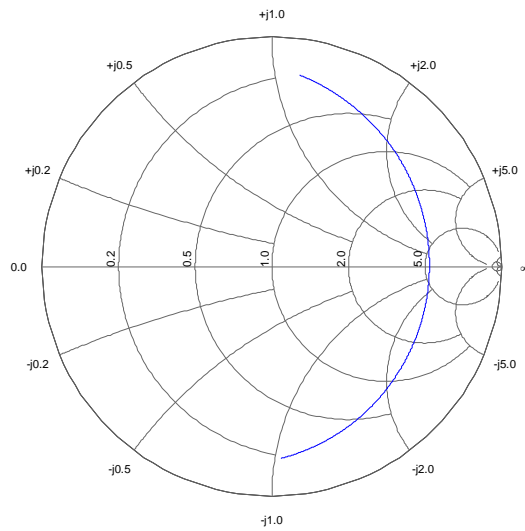


Figura 15. Gráfica realizada en Matlab



3.2.2. Lóbulos de radiación obtenidos en CST. Igualmente es posible comparar el patrón de radiación que arroja este simulador para cada uno de los métodos, Figura 16. El lóbulo de radiación de estos dos métodos son similares si se mantiene constante $\Phi=90^\circ$, pero difieren cuando $\Theta=90^\circ$. En la Figura 17, se advierte que los lóbulos de radiación inician desde antes de la impresión del parche.

Figura 16. a) y c) Lóbulo de radiación manteniendo constante $\Phi=90^\circ$ y $\Theta=90^\circ$ respectivamente, Método 1. b) y d) Lóbulo de radiación manteniendo constante $\Phi=90^\circ$ y $\Theta=90^\circ$ respectivamente, Método 2.

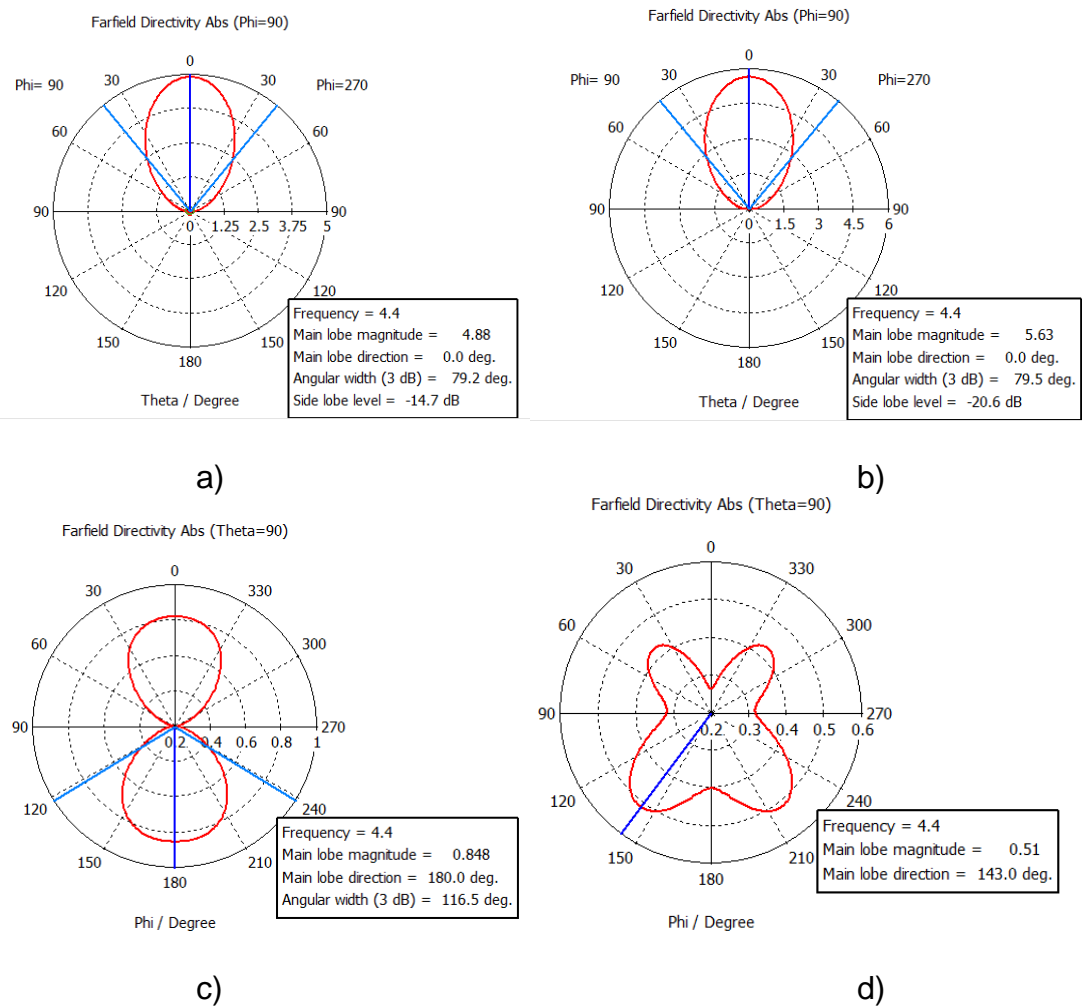
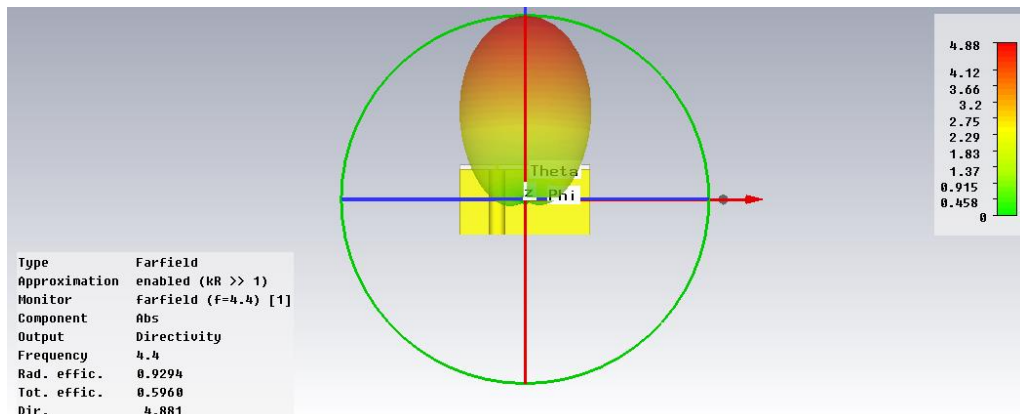
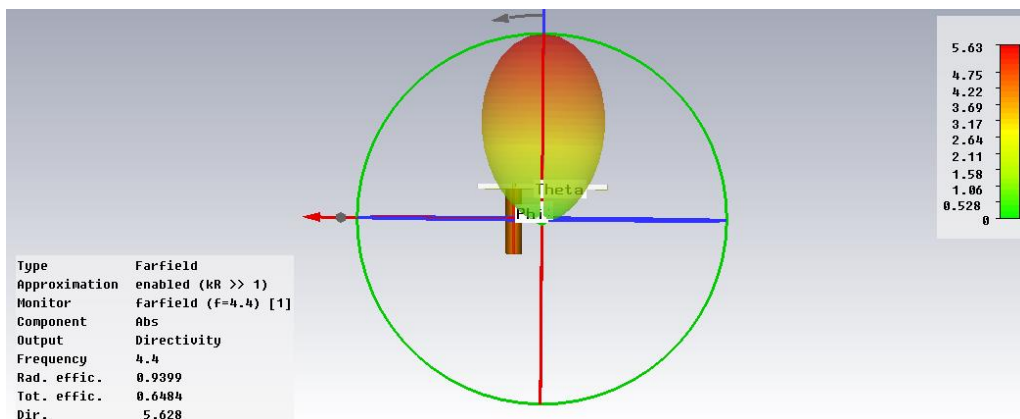


Figura 17. Lóbulo de radiación en 3D



a) Método 1

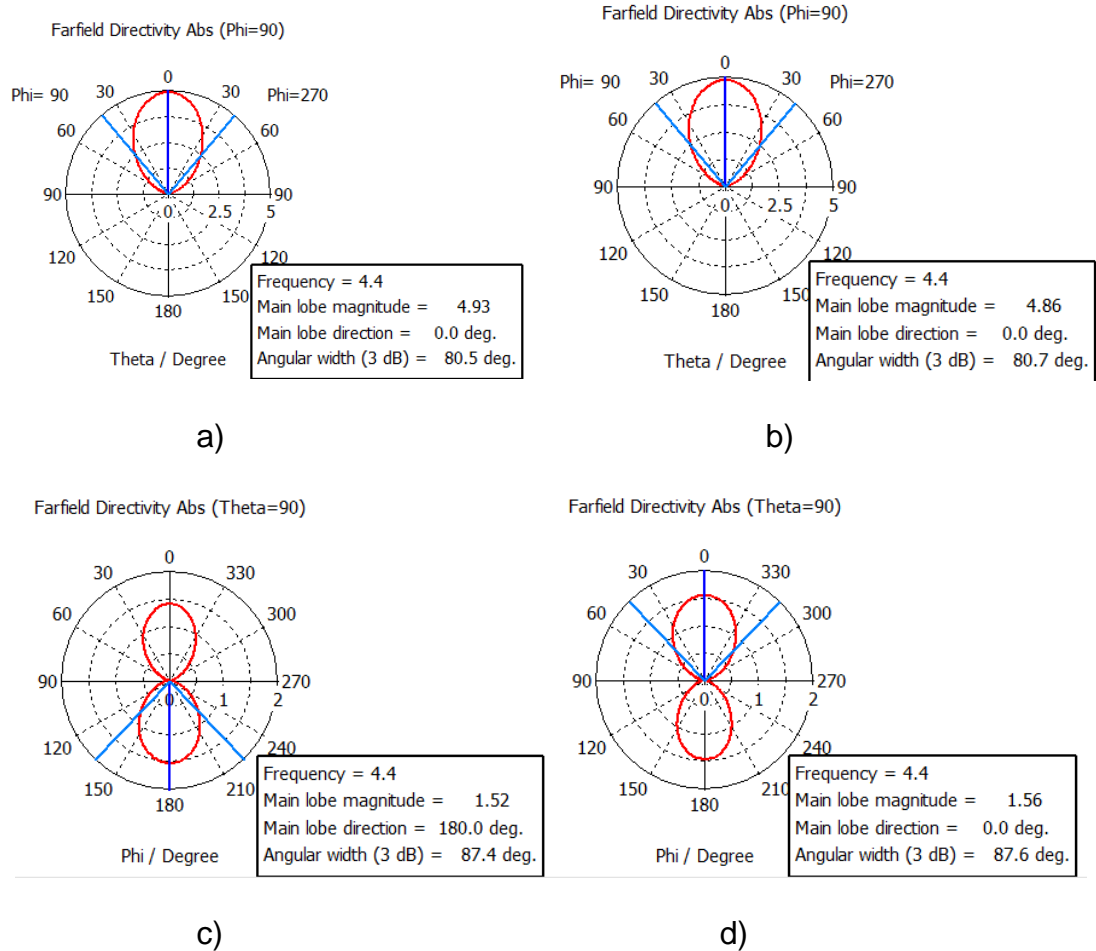


b) Método 2

Al cambiar las condiciones de contorno (“ $Z_{min}: Et=0$ ”, “ $Z_{max}: open\ add\ space$ ” y “ $open$ ” para maximos y minimos en las coordenadas “ x ,” y ”), los lóbulos de radiación son similares manteniendo constante tanto Theta como Phi (Figura 18), al igual que sus representaciones en 3D (Figura 19); en estas representaciones y con las nuevas condiciones de contorno, los lóbulos de radiación inician por encima del parche impreso, como no se observa en Figura 17.

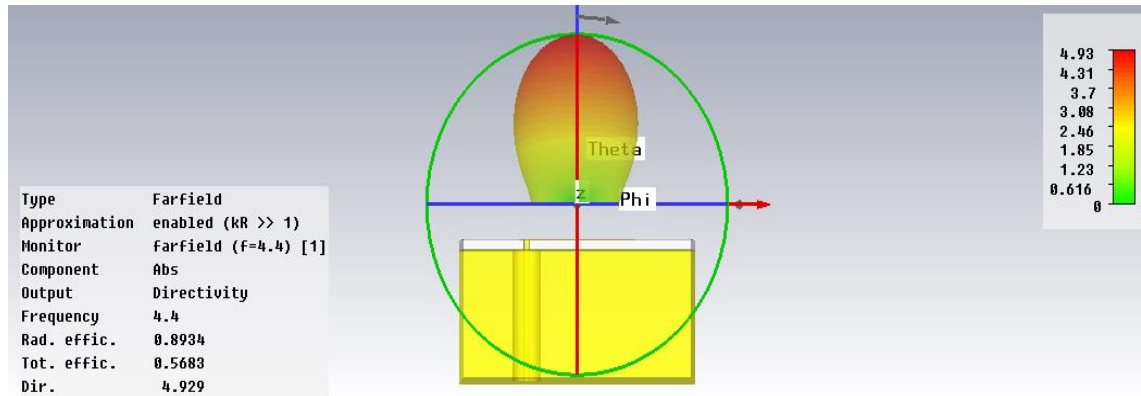
Nota: Las grafías sobre la carta de Smith no cambian ni su forma ni su posición.

Figura 18. a) y c) Lóbulo de radiación manteniendo constante $\Phi=90^\circ$ y $\Theta=90^\circ$ respectivamente. b) y d) Lóbulo de radiación manteniendo constante $\Phi=90^\circ$ y $\Theta=90^\circ$ respectivamente.

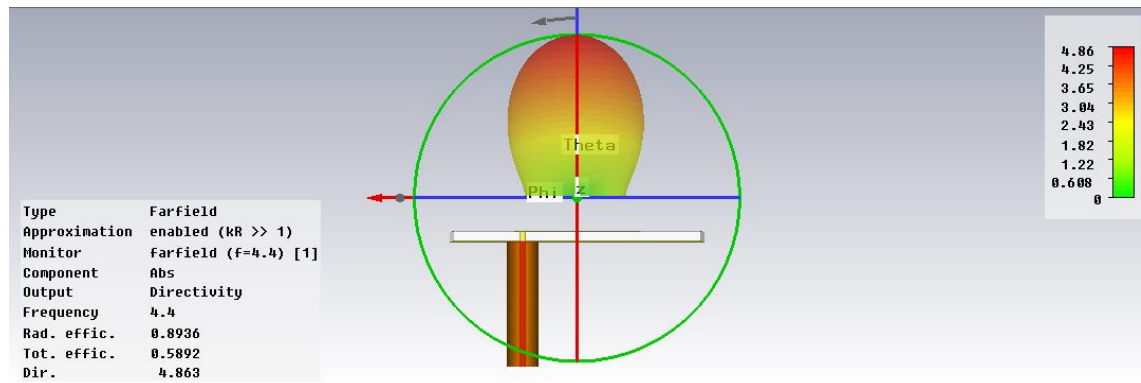


Al cambiar el material que recubre el conductor de cobre en el “Método 1”, por el del cable coaxial se aprecia que los dos métodos coinciden en todos los aspectos, es decir, tanto la impedancia de entrada como en la dirección y magnitud del lóbulo de radiación.

Figura 19. a) y b) Lóbulo de radiación en 3D, Método 1 y 2 respectivamente



a)



b)

3.2.3. Comprobación de los resultados expuestos por Güney. En (Güney, K., 1993) se expone un modelo matemático aproximado para la impedancia de entrada de antenas tipo parche alimentada en forma directa por cable coaxial, a partir de este modelo, Güney expone varios casos con sus respectivas gráficas, se verifica por parte de los autores de este texto dicho modelo ingresando las ecuaciones en MATLAB para obtener la gráfica de impedancia.

En la siguiente tabla se encuentran las características de las antenas para cuatro casos.

Tabla 1. Dimensiones de las antenas tipo parche para cuatro casos.

caso	ϵ_r	h (cm)	L (cm)	W (cm)	xf (cm)	tan δ	Frecuencias GHz
1	2.59	0.1588	13.97	20.45	0.635	0.003	0.64-0.675
2	2.50	0.1524	4.14	6.85	0.0	0.002	2.2-2.3
3	2.55	0.159	2.01	2.01	0.13	0.002	4.15-4.65
4	10.2	0.254	1.90	3.00	0.65	0.0024	2.18-2.38

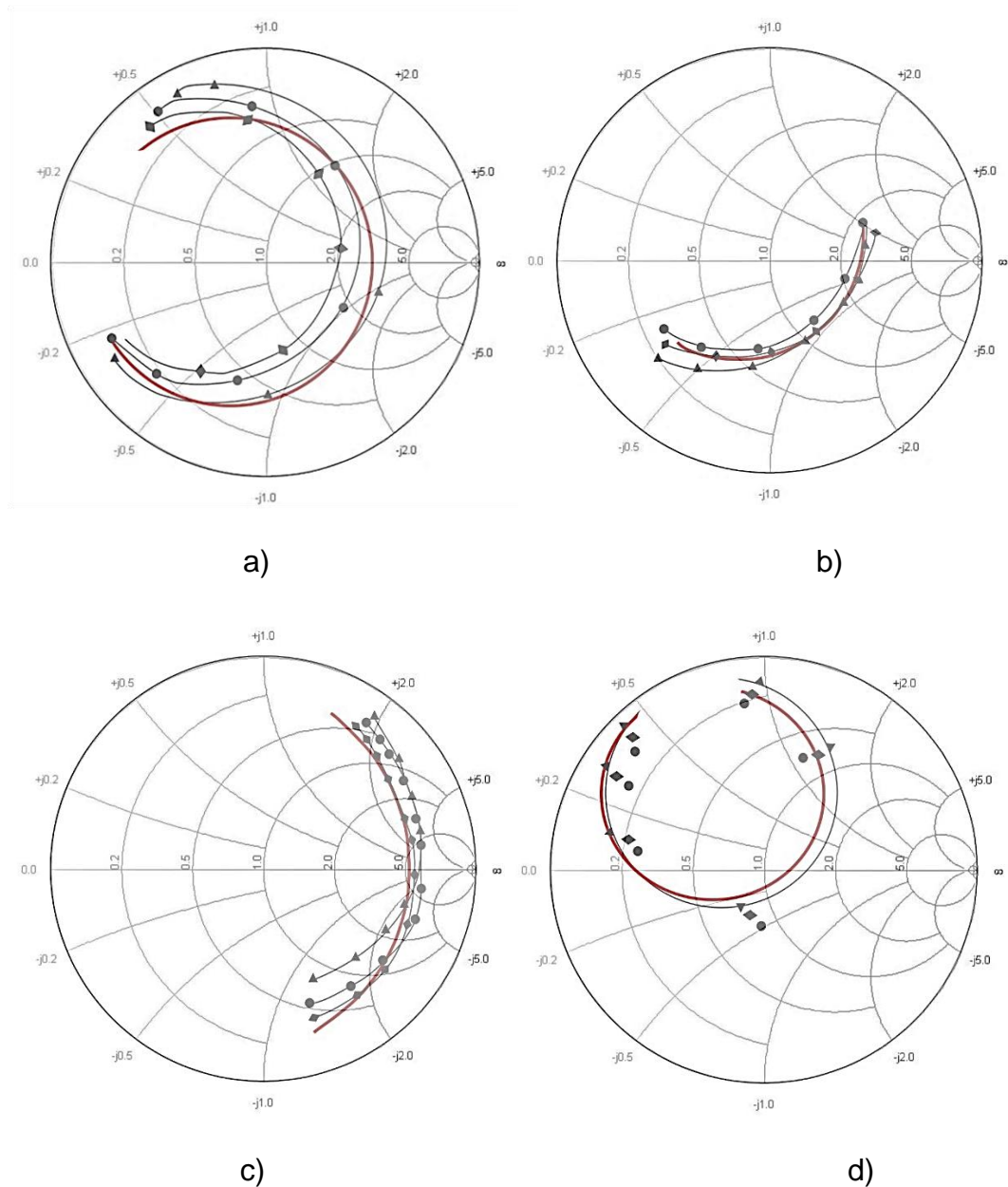
Fuente: Tomado de (Güney, K., 1993)

Donde ϵ_r es la constante dieléctrica relativa, h el grosor del sustrato, L y W el largo y ancho del parche radiante respectivamente, xf la distancia del borde al centro del parche, y tan δ es la tangente de pérdidas del material.

En la Figura 20 se aprecian los resultados para los cuatro casos planteados en la Tabla 1, en estas gráficas se muestran los resultados expuestos en (Güney, K., 1993) y con un línea roja los obtenidos por los autores.

Para cada una de las gráficas de la Figura 20 se tiene en cuenta el rango de frecuencias que estipula Güney para cada caso, como se muestra en la Tabla 1.

Figura 20. Carta de Smith para: a) Caso 1, b) Caso 2, c) Caso 3, d) Caso 4



3.3. DIMENSIONES DE LA ANTENA DE ESTUDIO

Se hizo la selección de una antena parche cuadrada de 5 cm de lado. Teniendo en cuenta la teoría de (Boualleg, A., Merabtine, N., 2005), media longitud de onda corresponde a la longitud de un lado del parche como lo muestra la Ecuación 19.

$$L = \lambda/2 \quad (19)$$

Teniendo en cuenta una longitud de onda supuesta en aire libre $\lambda = 10$ cm, se halla la frecuencia de resonancia de la antena con la Ecuación 20.

$$f_r = \frac{c}{\lambda \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (20)$$

Donde C es la velocidad de la luz, y ϵ_r la constante dieléctrica relativa del sustrato.

La frecuencia de resonancia es $f_r = 1.5$ GHz, utilizando $C = 3 * 10^8$ m/s y $\epsilon_r = 4.4$, que hace referencia al sustrato FR-4.

La selección de los puntos de alimentación mostrados en la Tabla 2, se ubican en el primer cuadrante de la antena, ya que en base a simulaciones previas realizadas en CST Studio se encontró que alimentar en puntos análogos en los diferentes cuadrantes se obtenían los mismos resultados.

Tabla 2. Posición de los puntos de alimentación.

Puntos de alimentación	xf [cm]	yf [cm]
(1)	0,2	0
(2)	0,9	0
(3)	2,3	0
(4)	0,2	1,25
(5)	0,9	1,25
(6)	2,3	1,25
(7)	0,2	2,4
(8)	0,9	2,4
(9)	2,3	2,4

Teniendo definidas las dimensiones y la localización de los puntos de alimentación como se observa en la Tabla 2, se realizan las simulaciones y la descripción de un modelo matemático en Matlab con el objetivo de comparar los resultados, esto se describe con más claridad en la sección 4.4.

Se define que el sustrato para trabajar debe ser FR-4 teniendo en cuenta que las baquelas comerciales para circuitos impresos poseen este material.

3.4. SIMULACIONES EN CST, IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO EN MATLAB® Y MEDICIONES EN VNA

Utilizando el “Método 2” (Ver anexo A), se extrajeron los resultados utilizando la ayuda computacional que ofrece el software CST STUDIO SUITE 2015 (Computer Simulation Technology) para observar el comportamiento de la impedancia de entrada en cada uno de los puntos de alimentación en la antena descrita en la sección 4.3, con el fin de comparar estos datos con los resultados obtenidos tanto con fórmulas teóricas para tres puntos (puntos 1, 2 y 3) y medidas con el VNA de cada antena con su respectivo punto de alimentación. Adicional a esto, estudiar el comportamiento de los lóbulos de radiación y densidades de corriente de las simulaciones.

3.4.1. Impedancia de entrada en CST, modelo matemático y medidas del VNA para tres puntos de alimentación. Las gráficas de impedancia de entrada sobre la carta de Smith arrojadas tanto por el simulador, las formulas descritas en la sección 3.3 y las medidas por el VNA, para los tres primeros puntos de alimentación (Puntos 1,2 y 3), se pueden ver en la Figura 20, en la que se presentan los resultados separados, y en Figuras 21 y 22 se extrajeron los resultados proporcionados por el simulador y el instrumento de medición VNA en un documento de texto, para luego graficarlos con ayuda de MATLAB en una sola gráfica, facilitando así el análisis de los resultados. Para estas gráficas se realizó un barrido de frecuencias entre 2 y 3 GHz para todos los casos.

Figura 21. Carta de Smith para el punto de alimentación en la posición (1). a) CST, b) VNA y c) Modelo matemático.

○ 2 (-0.38, 34.5) Ohm S-Parameter [Impedance View]
 ● 3 (8.85, 65.4) Ohm
 Frequency / GHz

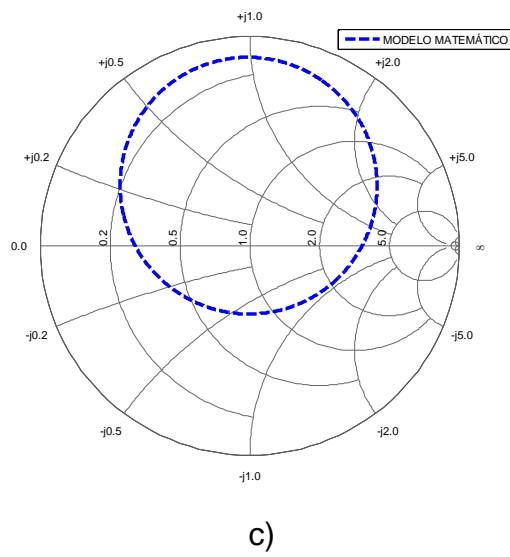
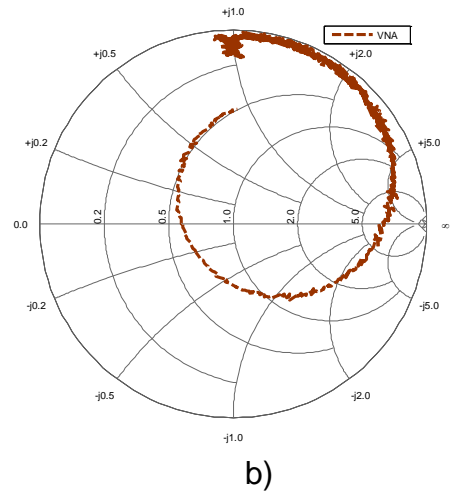
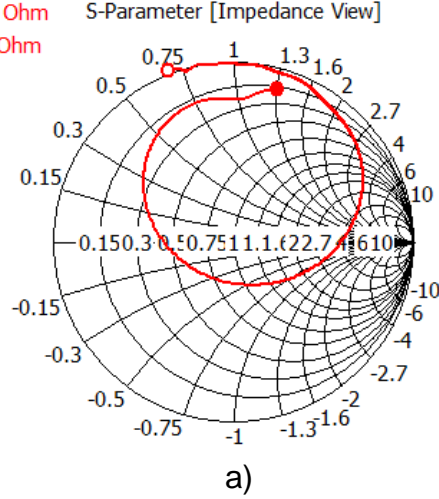


Figura 22. Carta de Smith para el punto de alimentación en la posición (2).

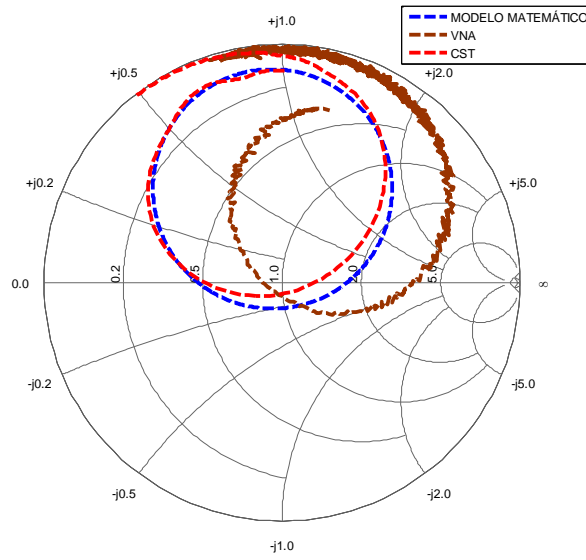
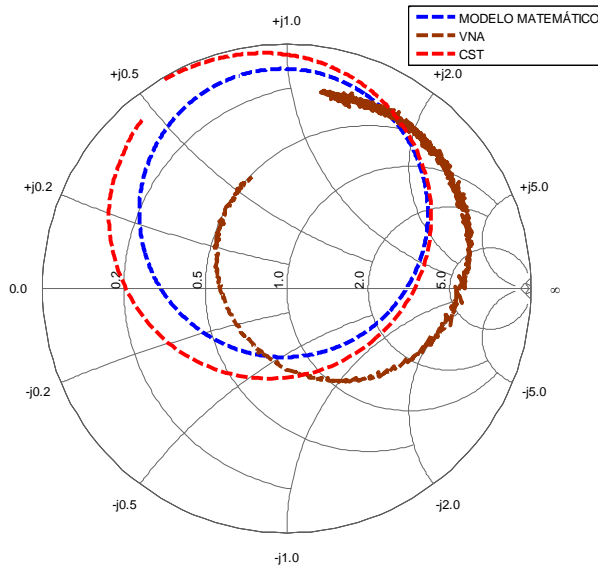


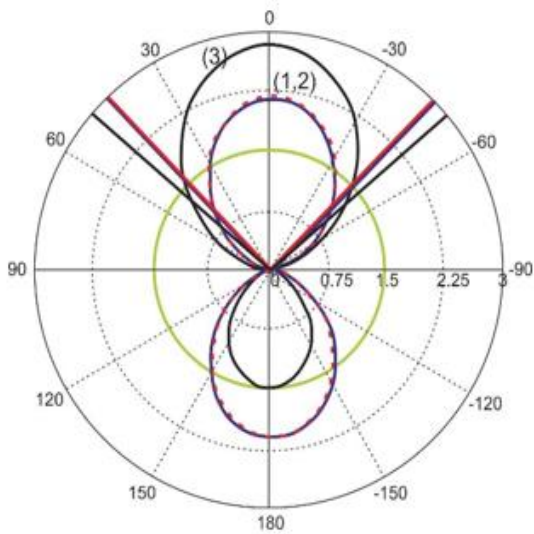
Figura 23. Carta de Smith para el punto de alimentación en la posición (3).



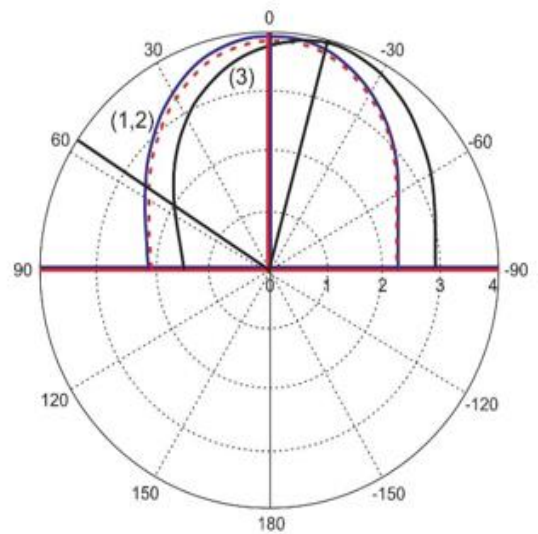
3.4.2. Lóbulos de radiación y densidad de corriente para tres puntos de alimentación. Para apreciar el comportamiento de la directividad con el cambio de la posición del punto de alimentación, se muestran representaciones en 2D (Figura 24 a y b) y 3D (Figura 25 a, b y c) de los lóbulos de radiación obtenidos mediante simulación.

En las representaciones de las corrientes superficiales (Figura 25) se mantendrá constante la fase de la fuente de alimentación en 90° para cada punto de alimentación con el fin de conocer el comportamiento en el máximo de la señal de alimentación.

Figura 24. Lóbulos de radiación de los puntos (1), (2) y (3) para: a) $\Theta=90^\circ$, b) $\Phi=180^\circ$.

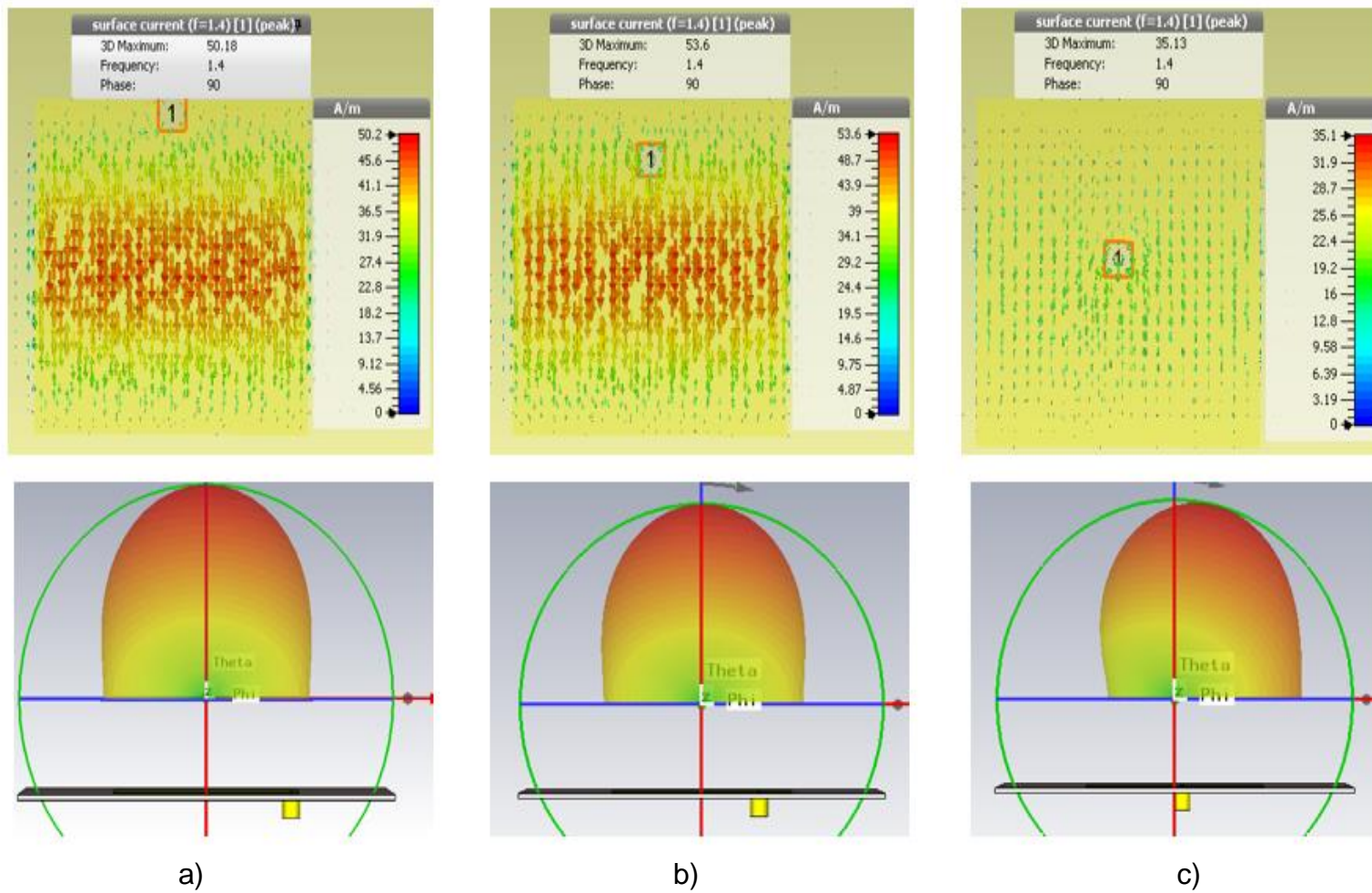


a)



b)

Figura 25. Distribuciones de corriente y lóbulos de radiación para: a) punto (1), b) punto (2), c) punto en (3)



3.4.3. Impedancia de entrada y lóbulos radiación de los puntos restantes.

Ya que el modelo matemático encontrado de la impedancia sólo puede ser aplicado a puntos de alimentación sobre la línea central ($y_f = 0$ cm), en esta sección se mostrarán comparaciones entre las gráficas realizadas por el simulador CST y las medidas obtenidas por el VNA para la impedancia de entrada de los puntos restantes (puntos 4, 5, 6, 7, 8 y 9). Adicional, se muestra la distribución de corriente y lóbulos de radiación en 2D y 3D. En la Figura 29 y 34 se encuentran los lóbulos en 2D de los resultados del simulador para la agrupación de los puntos 4, 5, 6 y los puntos 7, 8, 9 respectivamente, manteniendo constante el ángulo Theta en 90° y Phi en 180° .

En las Figuras 26, 27 y 28, se aprecian la impedancia de entrada de los puntos 4, 5 y 6 respectivamente, tanto para los datos extraídos de CST y las medidas del VNA, graficadas desde MATLAB.

Figura 26. Impedancia de entrada para el punto 4.

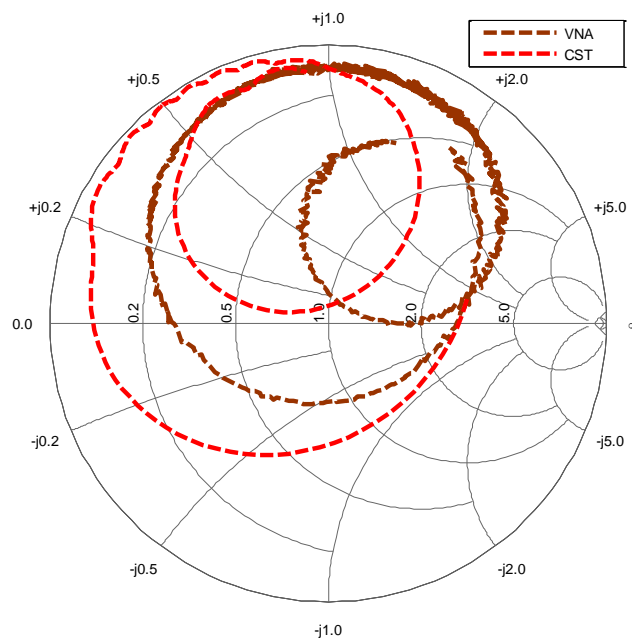


Figura 27. Impedancia de entrada para el punto 5.

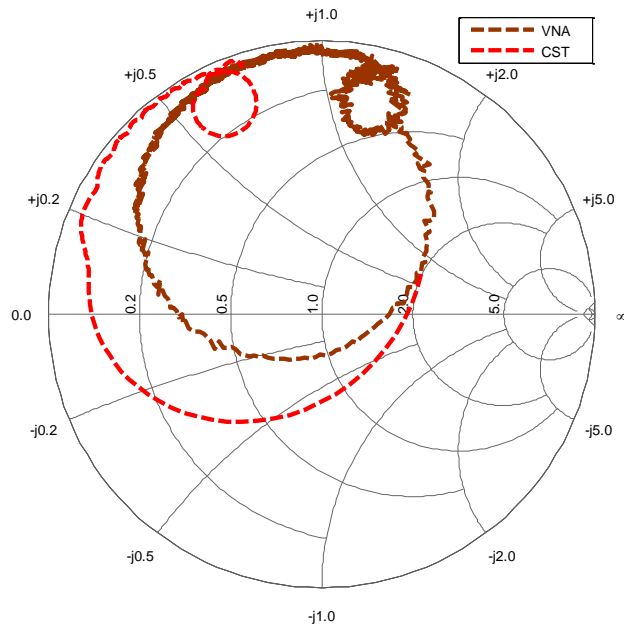
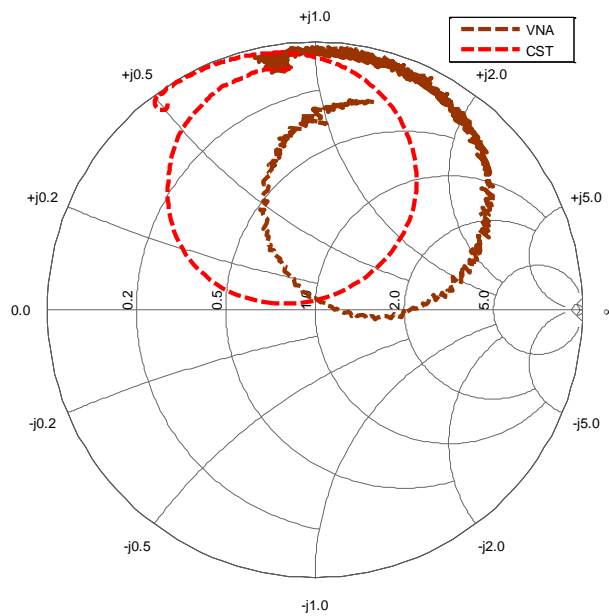
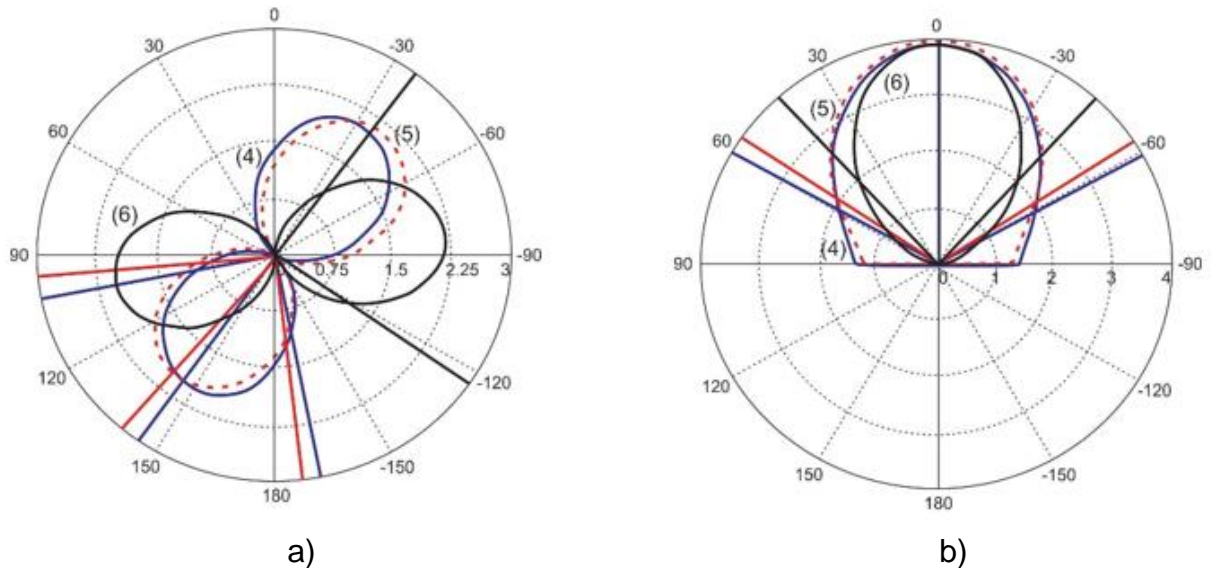


Figura 28. Impedancia de entrada para el punto 6.



Para los puntos 4, 5 y 6, situados en $y_f = 1.25 \text{ cm}$, se muestran las representaciones en 2D de los lóbulos de radiación manteniendo constante $\text{Theta}=90^\circ$ (Figura 29 a.) y $\text{Phi}=180^\circ$ (Figura 29 b.).

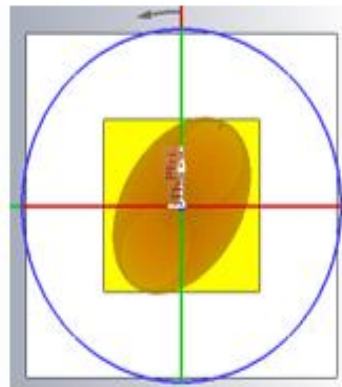
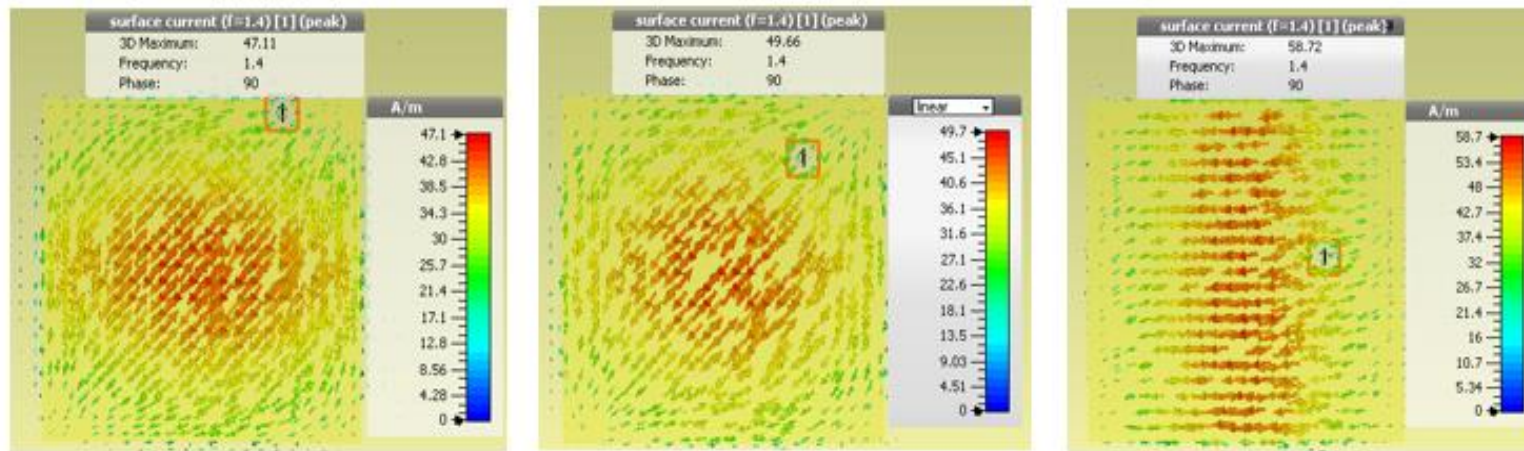
Figura 29. Lóbulos de radiación de los puntos (4), (5) y (6) para: a) $\text{Theta}=90^\circ$, b) $\text{Phi}=180^\circ$.



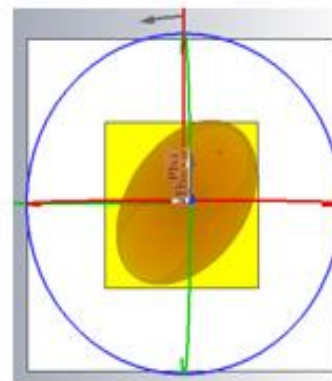
La línea azul hace referencia a los resultados para el punto (4) de alimentación, la línea roja discontinua al punto (5) y finalmente la línea negra al punto (6). Se observa en la Figura 29 a) que existe una rotación del lóbulo de radiación a medida que aumenta x_f sobre la línea $y_f = 1.25 \text{ cm}$. Para $\text{Phi}=180^\circ$ (Figura 29 b)) no es posible apreciar un cambio en la directividad, pero si en el ángulo de apertura.

En la Figura 30, se encuentran los lóbulos de radiación en 3D vistos desde la cara superior del parche, ya que la vista lateral no permite percibir los cambios en el lóbulo de radiación, en esta figura también aparecen las corrientes superficiales relacionadas a su respectivo punto de alimentación y lóbulo.

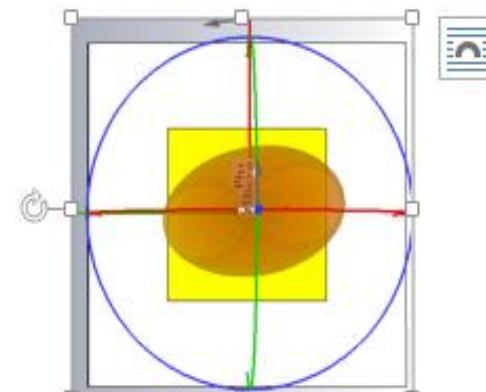
Figura 30. Distribución de corriente y lóbulo de radiación para: a) Punto (4), b) Punto (5), c) Punto (6)



a)



b)



c)

En la Figura 31, 32 y 33 se muestran las impedancias de entrada para los puntos restantes (puntos 7, 8 y 9).

Figura 31. Impedancia de entrada para el punto 7.

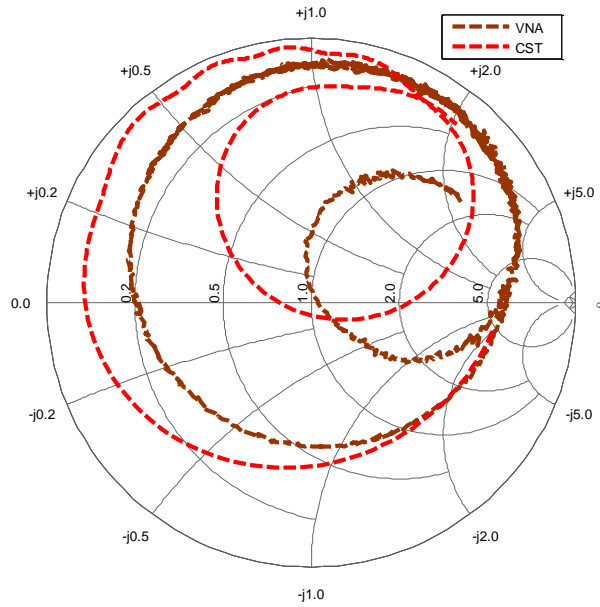


Figura 32. Impedancia de entrada para el punto 8.

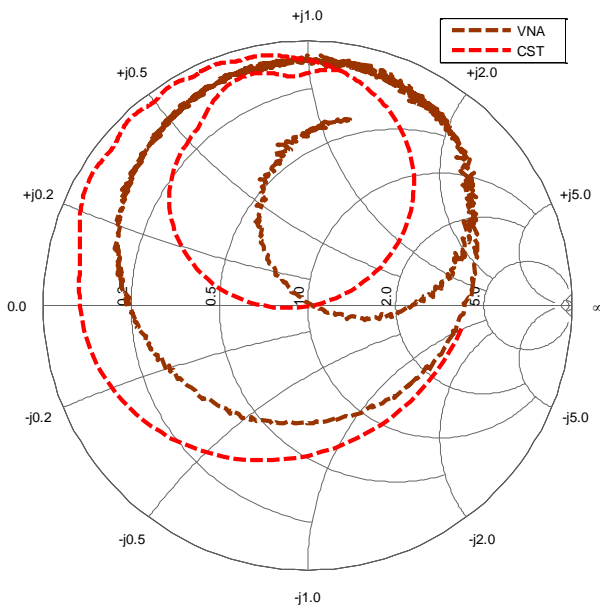
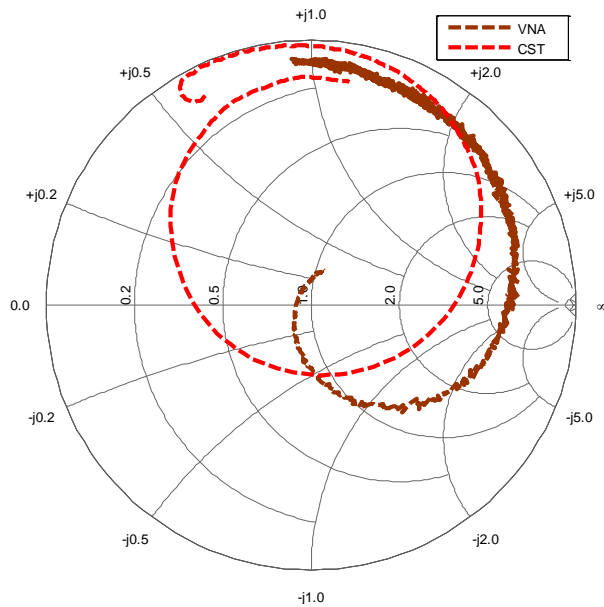


Figura 33. Impedancia de entrada para el punto 9.



En la Figura 34 se observa para los puntos 7, 8 y 9, situados en $y_f = 2,4 \text{ cm}$, las representaciones en 2D de los lóbulos de radiación, manteniendo constante $\text{Theta}=90^\circ$ (Figura 34 a.) y $\text{Phi}=180^\circ$ (Figura 34 b.).

Figura 34. Lóbulos de radiación de los puntos (7), (8) y (9) para: a) $\text{Theta}=90^\circ$, b) $\text{Phi}=180^\circ$.

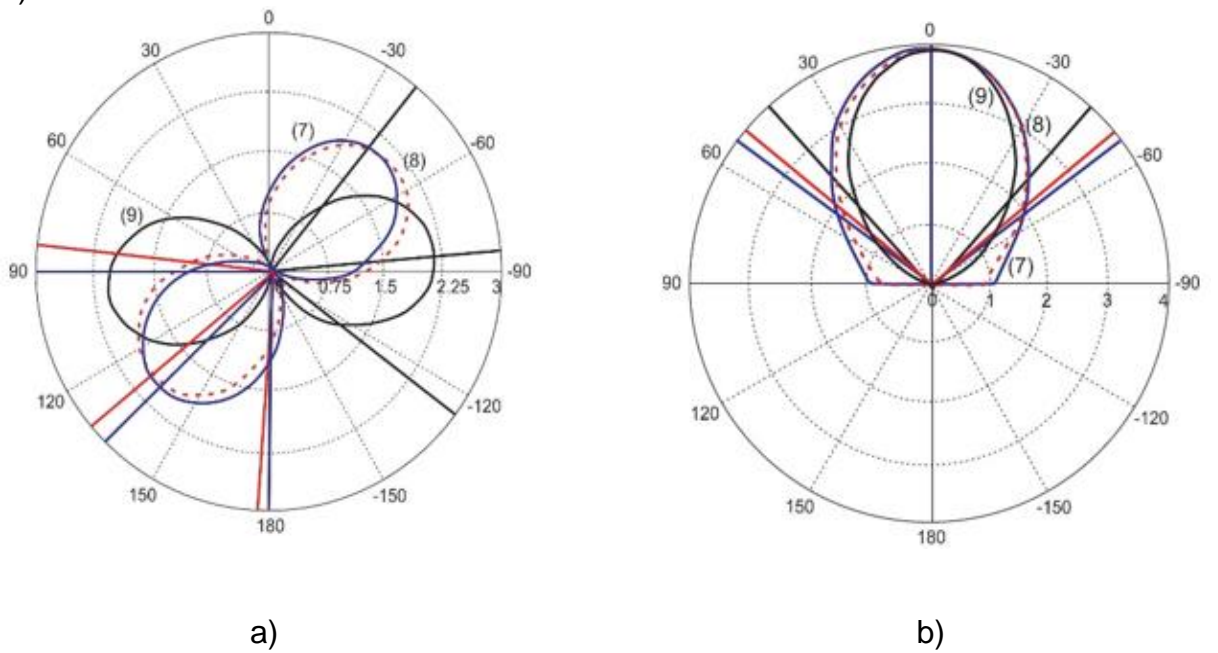
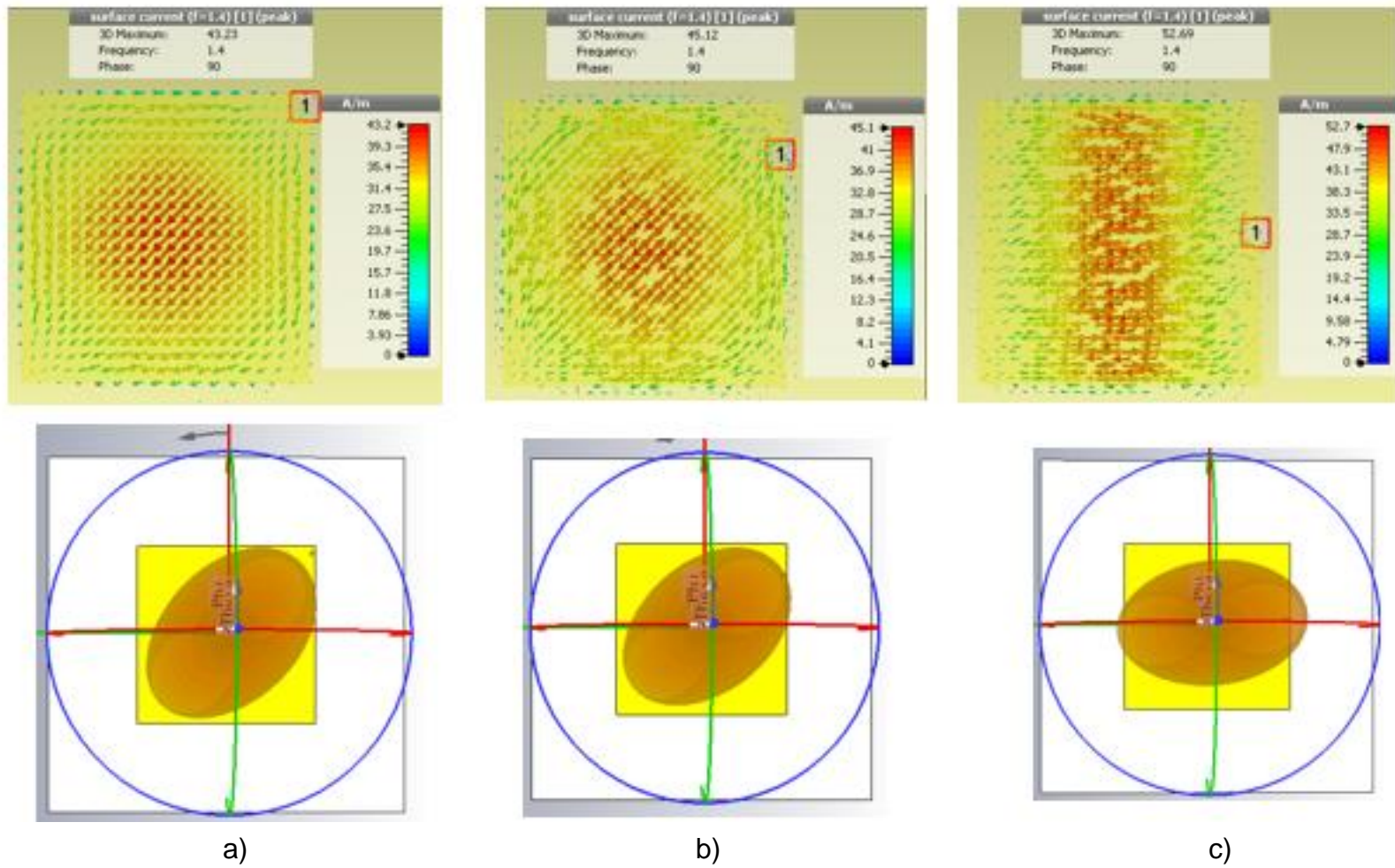


Figura 35 Distribución de corriente y lóbulo de radiación para: a) Punto (7), b) Punto (8), c) Punto (9).



En la Figura 35 las corrientes superficiales y los lóbulos de radiación, para la tercera agrupación de resultados, también presentan una rotación del lóbulo de radiación y las corrientes superficiales, en cada uno de los puntos, varían tanto en magnitud y dirección.

3.4.4. Parámetro S11. Por cada punto de alimentación se importaron los archivos, de CST y mediciones del VNA a MATLAB, referentes al parámetro S11, con el fin de trazar su magnitud en una sola gráfica. De la Figura 36 a la Figura 44, se muestra el parámetro S11 para los puntos de alimentación del 1 al 9 respectivamente.

En las gráficas, referentes al parámetro S11, se aprecia que las frecuencias de resonancia de las antenas implementadas, se encuentran desplazadas en frecuencia, también que las frecuencias de trabajo de las antenas alimentadas en los puntos 4, 6 y 8 se posicionan en el primer armónico de la frecuencia de resonancia. El único punto de alimentación que presenta un comportamiento favorable para una frecuencia cercana a la de resonancia calculada en la sección 4.3 ($f_r = 1.5 \text{ GHz}$), es el punto 6. En la Figura 40, que hace referencia al del punto de alimentación 5, se encuentra una frecuencia de trabajo en 2.1 GHz la cual se ubica a $3/2$ veces de la frecuencia teórica de la antena.

Figura 36. Parámetro S11 para el punto 1.

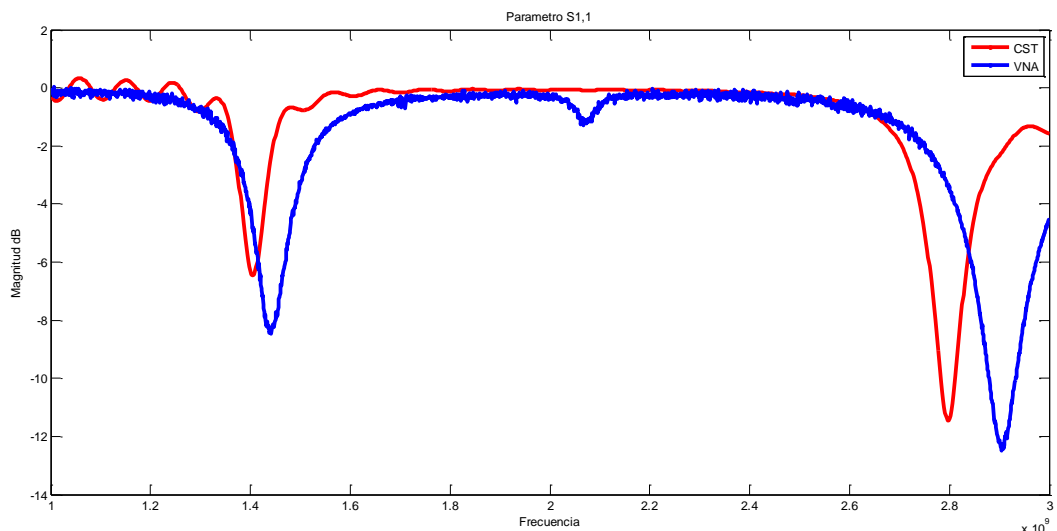


Figura 37. Parámetro S11 para el punto 2.

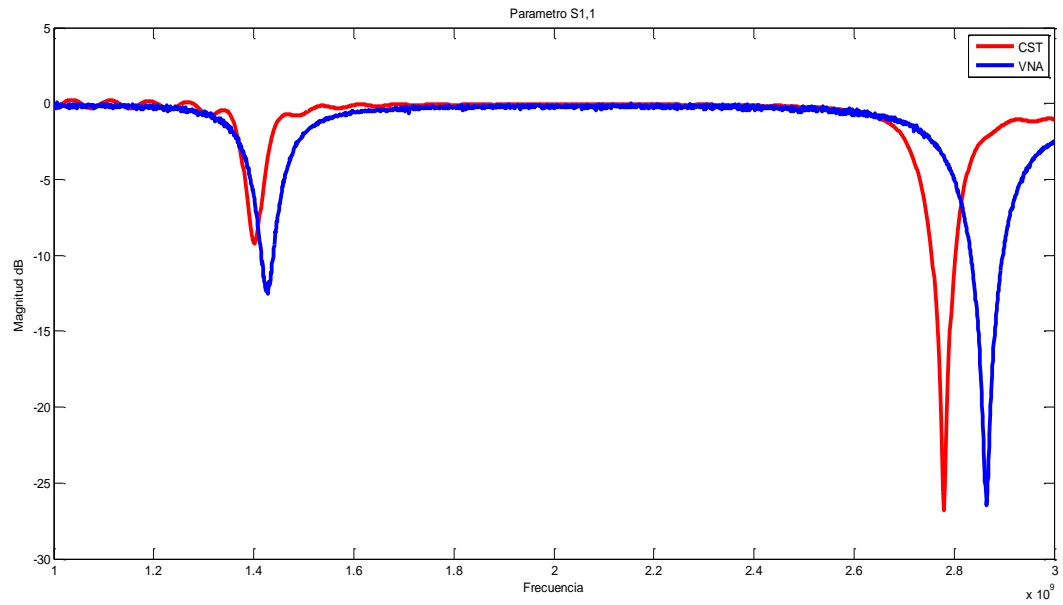


Figura 38. Parámetro S11 para el punto 3.

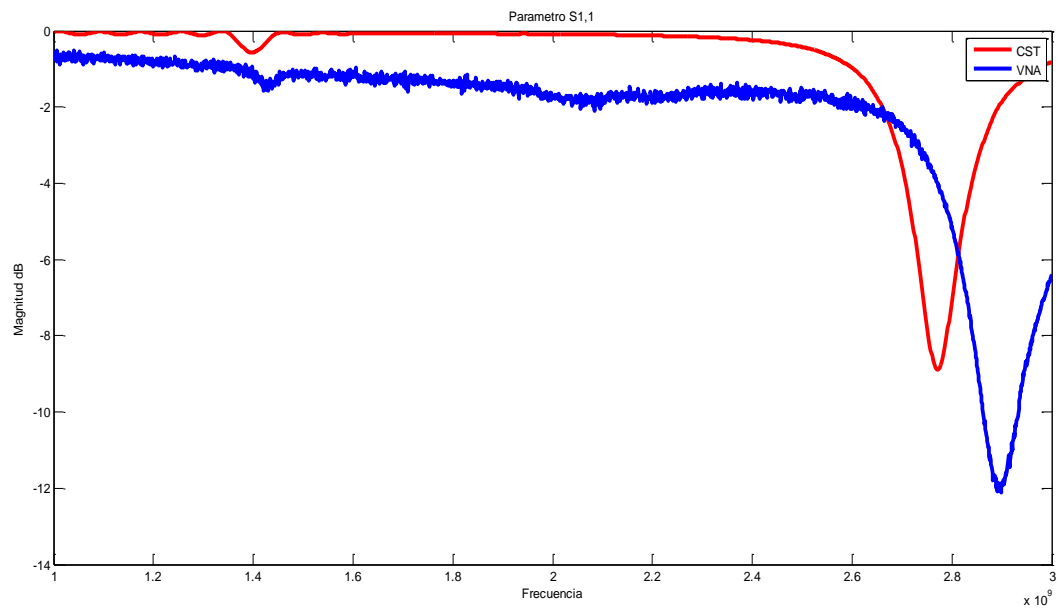


Figura 39. Parámetro S11 para el punto 4.

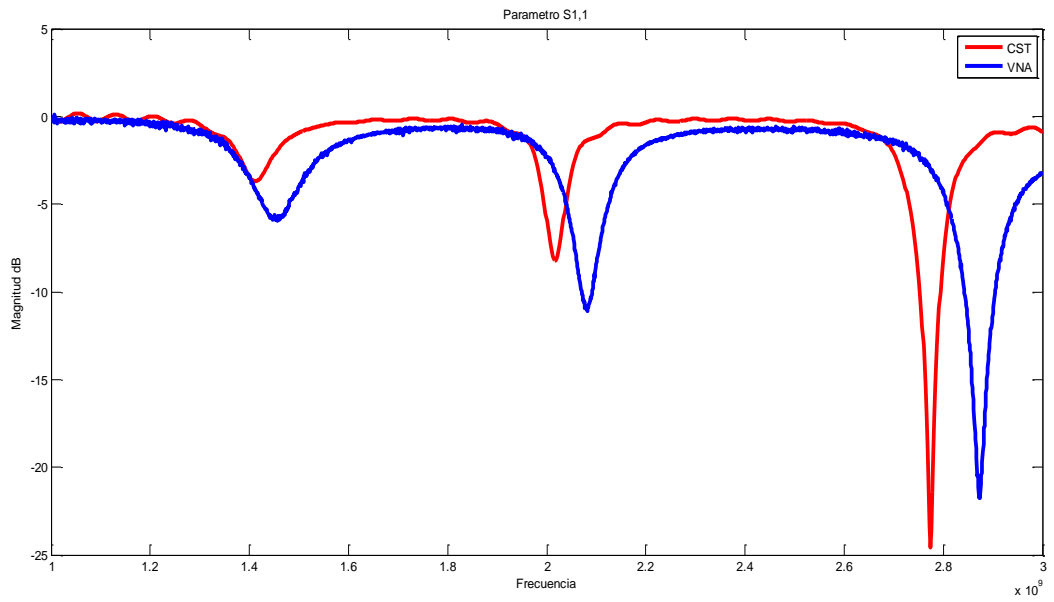


Figura 40. Parámetro S11 para el punto 5.

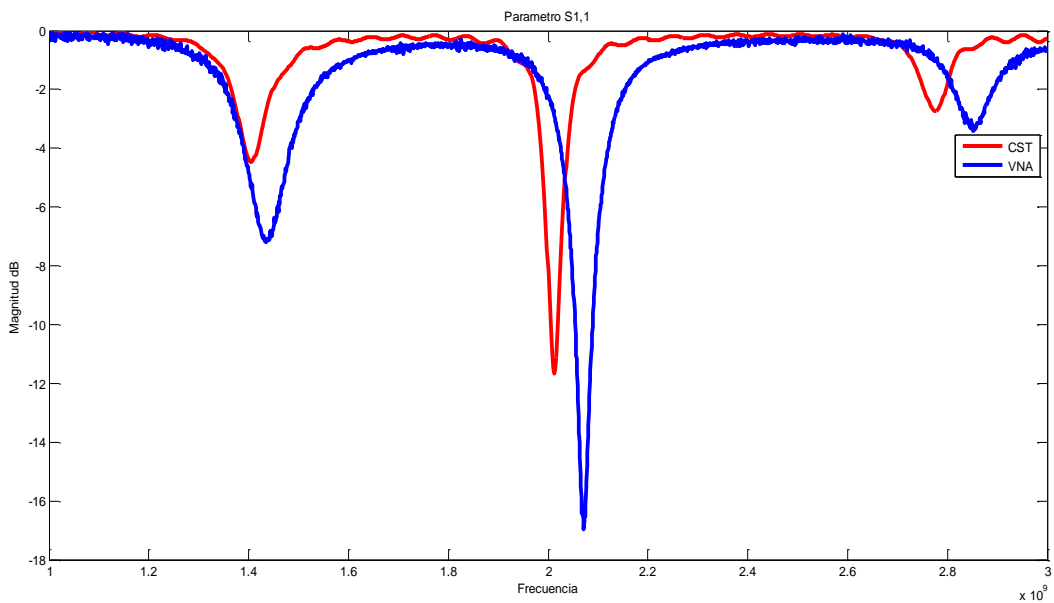


Figura 41. Parámetro S11 para el punto 6.

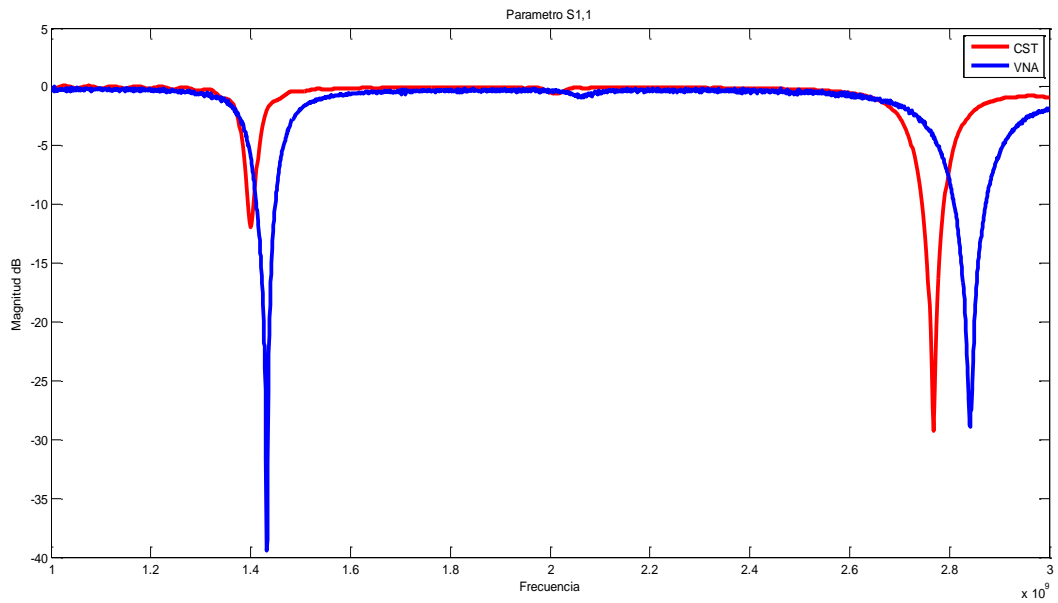


Figura 42. Parámetro S11 para el punto 7.

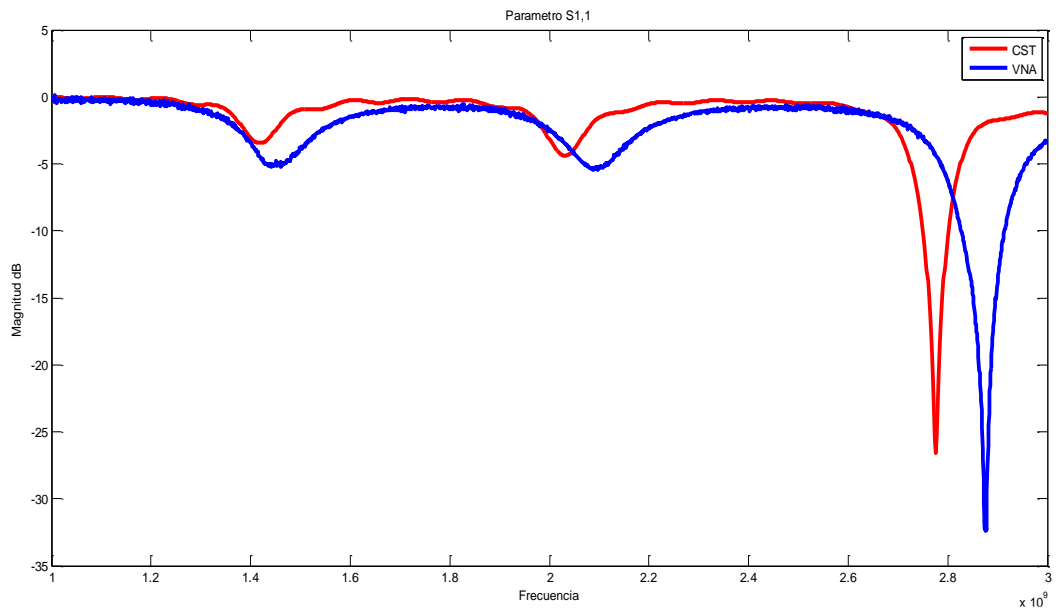


Figura 43. Parámetro S11 para el punto 8.

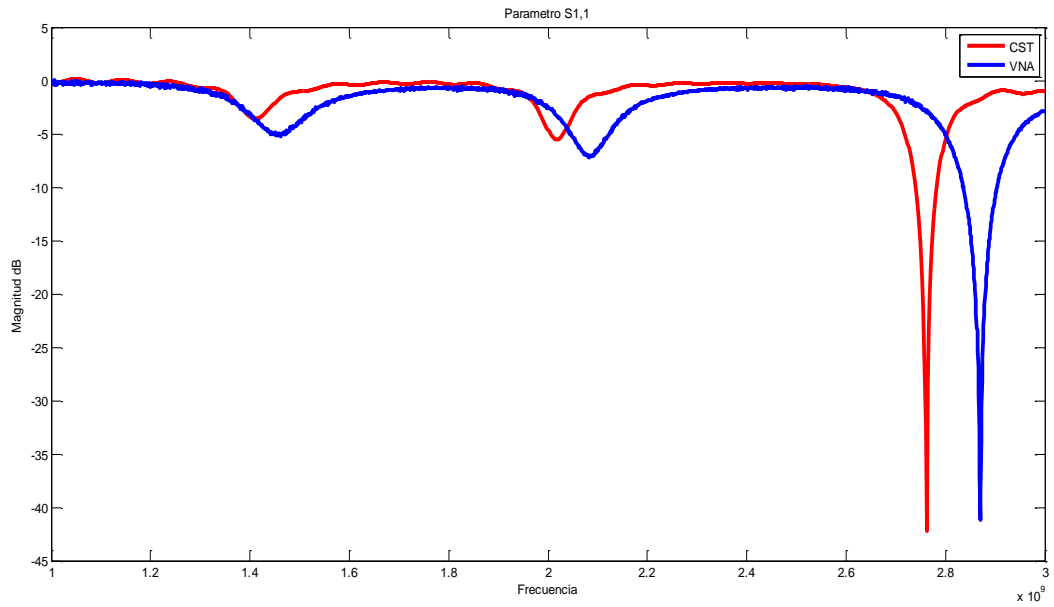
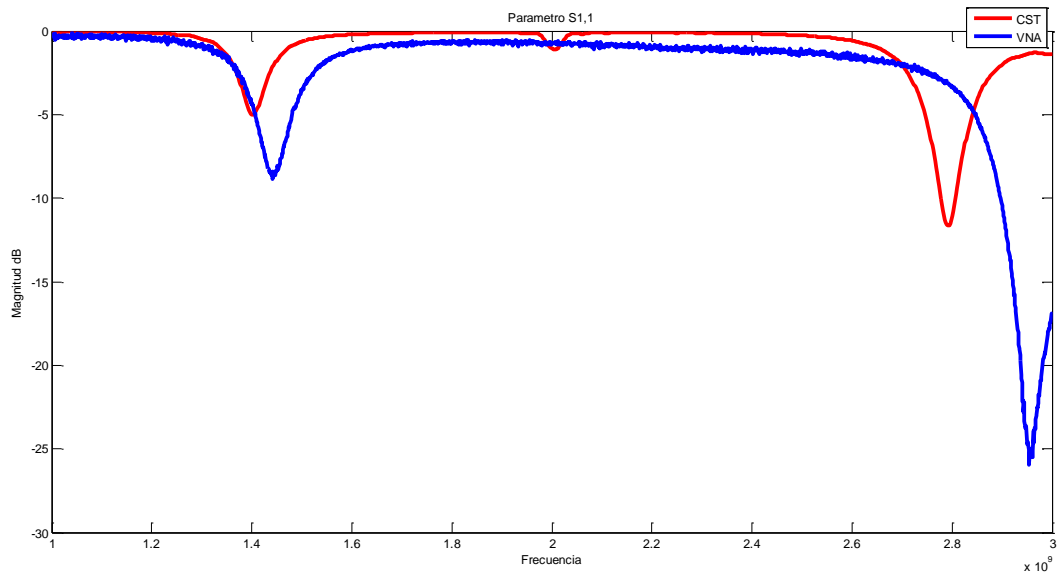


Figura 44. Parámetro S11 para el punto 9.



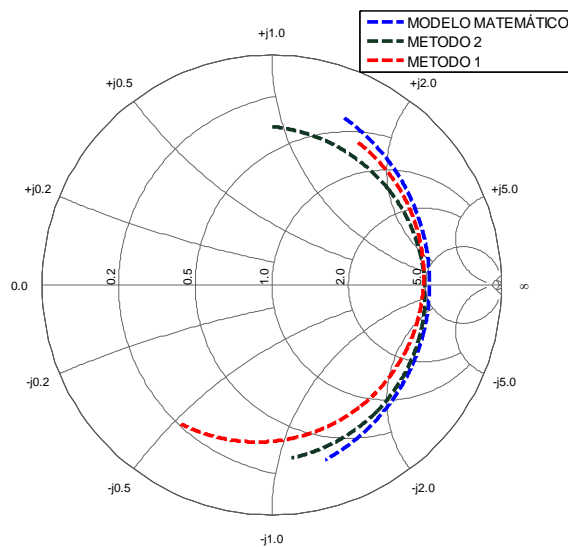
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. EL ESTUDIO PRELIMINAR

De las gráficas de impedancia de entrada arrojadas por las fórmulas descritas en la sección 3.3 (ver Figura 15) y la comparación tanto con el simulador (ver Figura 14), es posible establecer que para sustratos delgados, el modelo matemático para la impedancia de entrada, presentan semejanzas. Al analizar estos resultados se verifica que el “Método 2” de simulación presenta mayor concordancia con el modelo matemático, ya que la posición de la impedancia de entrada sobre la carta de Smith se encuentra en el mismo lugar geométrico. Durante este proceso de verificación se evidenció, que la posición de la gráfica en la carta de Smith para un rango de frecuencia establecido, presenta una rotación con respecto al centro de esta al momento de prolongar o acortar la guía de onda.

Con la descripción de las ecuaciones en MATLAB del modelo matemático para la impedancia entrada de una antena tipo parche tomadas de (Güney, K., 1993), se realizó la gráfica sobre la carta de Smith con el propósito de verificar sus resultados. Como se puede observar en la Figura 20 y 45, se obtienen aproximaciones coherentes, lo cual permite admitir este modelo para comparar con resultados posteriores de simulación.

Figura 45. Resultados agrupados del Modelo matemático y los métodos de simulación

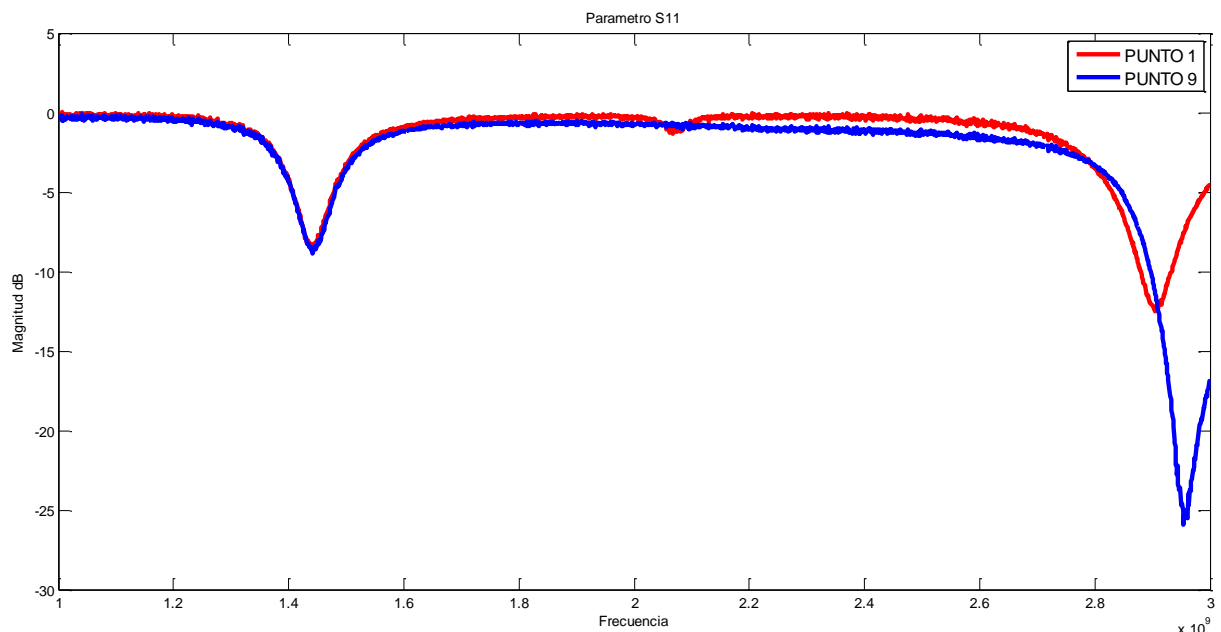


4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS COMPUTACIONALES Y MEDIDAS DEL VNA

En las Figuras 21, 22 y 23 están expuestas las impedancias de entrada arrojadas por el modelo matemático, el simulador y los resultados de las medidas del VNA. En estas gráficas la impedancia de entrada modelada matemáticamente se presentan como círculos completos, ya que estas desprecian cualquier tipo de pérdida de energía y el barrido en frecuencia se hace en un rango amplio. Entre las simulaciones y las medidas, se encuentran similitudes en sus formas, pero presentan un desplazamiento angular, esto se debe a la calibración del dispositivo de medición. Este mismo cambio angular se presenta en cada gráfica de impedancia, referente a cada punto de alimentación.

De los diferentes puntos de alimentación de la Figura 13, al comparar el punto (1) con el (9), se puede evidenciar similitudes en las frecuencias cercanas a la frecuencia de resonancia de la antena en sus respectivas gráficas del parámetro S11 (ver Figura 46). Cabe aclarar que para las frecuencias cercanas a 2.9 GHz no se encuentran semejanzas, esto puede ser debido a que el punto (9) está en las coordenadas $x_f = 2,3 \text{ cm}$ y $y_f = 2,4 \text{ cm}$ y no sobre la línea central del parche.

Figura 46. Comparación del parámetro S11 para los puntos 1 y 9.



En la Figura 25 es posible observar que a medida que la posición de alimentación se aproxima al centro del parche, sobre la línea $y_f = 0$, el lóbulo cambia su forma y dirección, otro resultado observable hace referencia a las corrientes superficiales, pues estas no cambian su dirección pero si su magnitud. Esto puede ser utilizado para cambiar la orientación del lóbulo con la conmutación de los puntos de alimentación sobre el parche.

En la Figura 29 y 34 es notoria la rotación que sufre el lóbulo de radiación, la modificación de la dirección y la densidad para las distribuciones de corrientes en los casos tratados en estas figuras.

Al observar las Figuras 26, 27 y 28 junto con las Figuras 31, 32 y 33, se puede contemplar una sintonización de la antena tan solo con la variación de punto de alimentación.

Al comparar las gráficas mostradas desde la Figura 36 a la Figura 44, es posible determinar que una frecuencia óptima de trabajo caería en el primer armónico de la frecuencia de resonancia de la antena, con excepción para el punto (5), ya que en este punto se evidencia un pico ubicado a $3/2$ de la frecuencia de resonancia. También se aprecia que los puntos con menor coeficiente de reflexión caen alrededor de 2.8 Ghz, estos puntos son los ubicados en las posiciones, de mayor a menor coeficiente de reflexión, 2, 6 y 8.

5. CONCLUSIONES

- Este trabajo evidencio una gran concordancia entre un modelo teórico, las simulaciones y las medidas realizadas en el VNA
- Las formulas planteadas por Güney para la impedancia de entrada de una antena parche con alimentación coaxial presenta buenos resultados con respecto a las simulaciones. Ya que los software matemáticos tiene un precio elevado es posible utilizar este método en trabajos futuros.
- Durante el proceso de simulación en CST se evidenció, que la posición de la gráfica en la carta de Smith para un rango de frecuencia establecido, presenta una rotación al momento de prolongar o acortar la guía de onda. Como puede ser explicado por la teoría de líneas de transmisión.
- Con la variación del punto de alimentación sobre el parche se logra modificar la directividad, generar una rotación del lóbulo de radiación y alterar tanto dirección y densidad de las corrientes superficiales. Esto es importante al momento de analizar la teoría de alimentaciones inteligentes pues es posible relocalizar el lóbulo de radiación con tan solo modificaciones mecánicas.
- Una antena parche puede ser sintonizada tan solo con el movimiento del punto de alimentación. Además si la posición de alimentación se acerca al centro de cualquier cuadrante, es posible obtener una frecuencia de resonancia distinta a la calculada para el parche cuadrado.

BIBLIOGRAFIA

AMMANN, M., Design of rectangular microstrip patch antennas for the 2.4 ghz band, En: Applied Microwave & Wireless, 1997. p. 24-34.

ANGUERA, JAUME. & PÉREZ, ANTONIO. Teoría de Antenas. Guía de estudio. Universitat Ramon Llull: Lluís Vicent, 2008, Ingeniería La Salle, Barcelona, España, pp. 19-57.

BALANIS, A. Antenna theory, analysis and design. 3rd edition. Canada: John wiley & sons, 2003. pp 320.

BOUALLEG, A., MERABTINE, N. Analysis of radiation patterns of rectangular microstrip antennas with uniform substrate. En: Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, 2005. V. 8, pp. 88-91.

Cardama, A., et all. Antenas,. 2ª edición. Barcelona, España: Jordi Girona Salgado, 1999. 468 p.

CARVER, K. R. Practical Analytical Techniques for the Microstrip Antenna. En: Proc. Workshop on Printed Circuit Antennas, 1979. pp. 7.1-7.20.

GÜNEY, K. Input Impedance of Electrically thin and thick Rectangular Microstrip Antennas. En: Department of electronics Engineering. Kayseri. October, 1993. vol. 1. pp 193-205.

GUPTA, K. C., GARG, R., GAHL, I. J. Microstrip Lines and Slotlines. 2ª edition. Boston: 1996. 535 p.

The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas. IEEE Std 145-1983. United States of America: IEEE, 1993. 36p.

JAMES, J. R., HALL, P. S. Handbook of microstrip antennas, volume 2. London: Jr James & P S Hall Ltd, 1989. 1313 p.

LÓPEZ, G. Modelado circuital de diferentes configuraciones de antenas microstrip. Tesis de Ingeniero en telecomunicaciones. Barcelona: Universidad Autónoma de Barcelona. Facultad de Ingeniería de Telecomunicaciones, 2013. 140 p.

NERI, R. Líneas de transmisión. Mexico D.F.: McGRAW-HILL., 2004, 479 p.

SINGH, G. AND SINGH, J. Comparative Analysis of Microstrip Patch Antenna With Different Feeding Techniques. En: international Journal of Computer Applications. Nueva York: 2012. pp. 18-22.

ANEXO A

PROCESO DE SIMULACIÓN NUMERICO EN CST

Se observarán diferentes modificaciones a la estructura de la antena y a los límites del dominio computacional, entre estas se podrán encontrar dos métodos para realizar las simulaciones, los cuales hacen referencia a modificaciones en la estructura del modelo, igualmente se cambiarán los límites computacionales para observar el comportamiento del simulador a estos cambios, finalmente estos resultados también serán contrastados con un programa descrito en MATLAB.

Las primeras simulaciones que se realizan (Método 1), se hacen con ayuda del tutorial incluido en el programa CST, en el cual el plano de tierra de la antena se prolonga tanto como la guía de onda que alimenta el parche impreso sobre el sustrato, además, como lo sugiere este tutorial, el dieléctrico que acompaña el conductor central del cable coaxial está compuesto del mismo material del sustrato. En el segundo método de simulación, el plano de tierra es tan grueso como la impresión del parche, esto para aproximar las simulaciones a los materiales accesibles, y solo se prolonga más allá del plano de tierra un conductor o guía de onda, con la característica de que el conductor central ya no está acompañado de un dieléctrico similar al del sustrato, sino con el dieléctrico correspondiente al de un cable coaxial (Teflón PTFE). A continuación se mostrarán las estructuras de estos dos métodos, así mismo se modifica el tipo de frontera que limita el dominio numérico de cómputo para corroborar resultados obtenidos y por último se compararán los resultados de estas simulaciones.

En la siguiente tabla se especifican las dimensiones, características de los materiales y las variables utilizadas en CST (Tomado del caso 3, Güney, K., 1993).

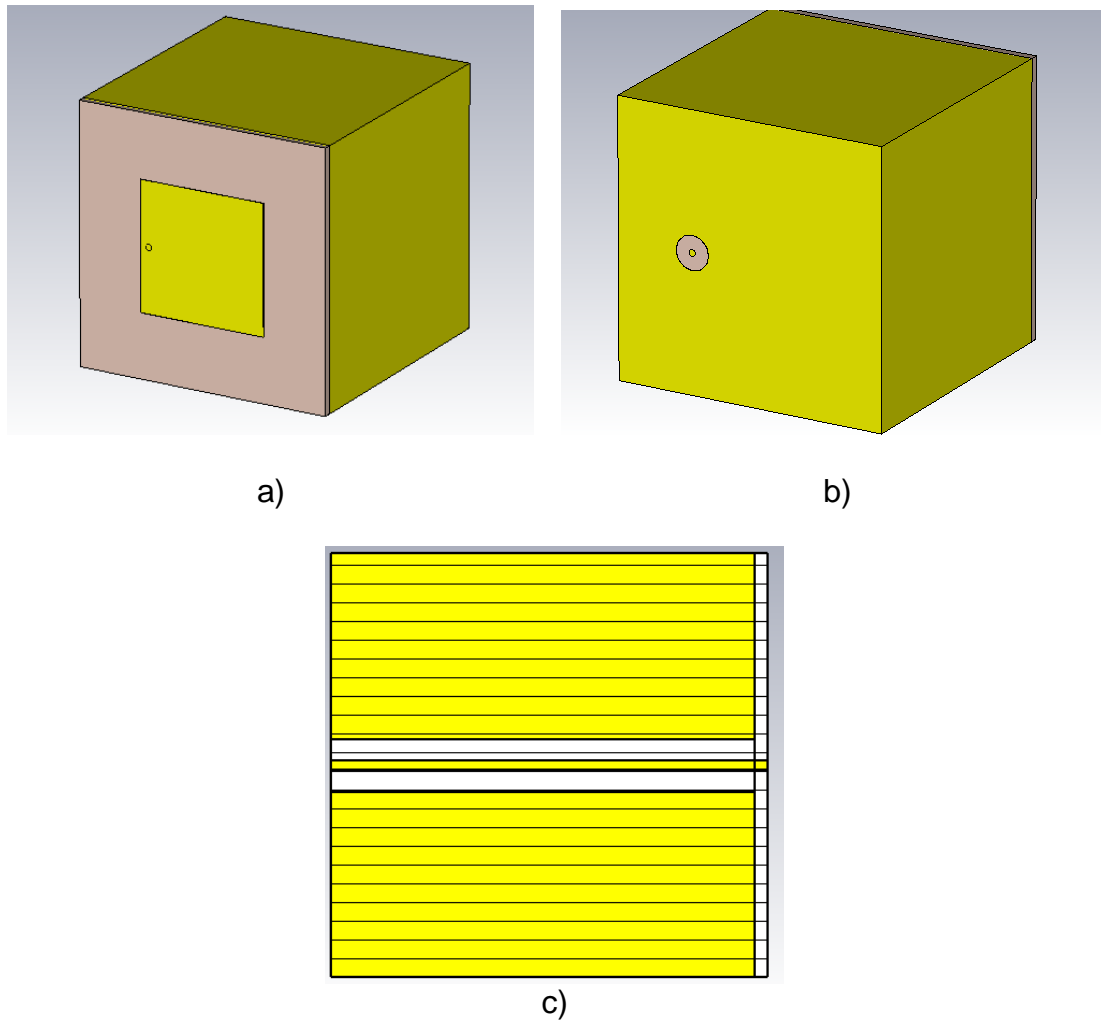
En la Figura A.1 se muestra como es la construcción del primer método de simulación. Es claro como el plano de tierra se prolonga tanto como el conductor coaxial lo haga. Cabe resaltar que en la Figura A.1 c), se realiza un corte transversal para observar con mayor claridad que el recubrimiento del cable conductor del coaxial está formado del mismo material del sustrato.

Tabla 3. Dimensiones y características del parche de prueba (ver Figura 1).

	Variable	Método 1	Método 2
Material de la guía de onda		Igual al sustrato	Teflón PTFE
Constante dieléctrica del sustrato	ϵ_r	2.55	
Grosor de impresión de cobre	g	0.005	
Longitud del parche (cm)	l	2.01	
Ancho del parche	w	2.01	
Ancho del sustrato	h	0.159	
Ancho del plano de tierra / Longitud del cable coaxial	lc	2 / 2	
Radio interno del conductor	ri	0.05	
Radio externo del dieléctrico del conductor	ro	0.25	
Punto de alimentación (desde el borde del parche)	xf	0.13	

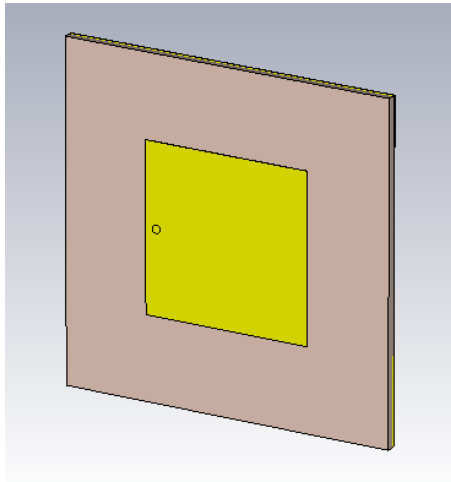
Fuente: Autores

Figura A.1. Método 1. a) Cara frontal, b) Cara posterior y c) Corte transversal

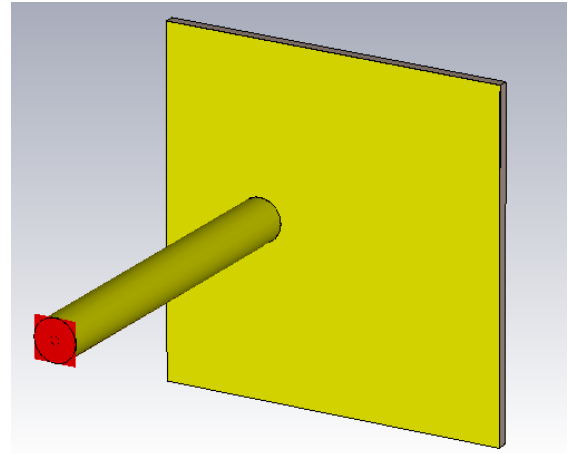


En el segundo método, como se muestra en la Figura A.2. c), se puede observar que la tierra no se extiende por toda la longitud del cable coaxial y que el recubrimiento de este mismo hace contacto directo con la tierra del parche, igualmente se aprecia, por la diferencia de colores, que el material que recubre al conductor de cobre de la sonda es diferente al material sobre el que está impreso el parche (Sustrato).

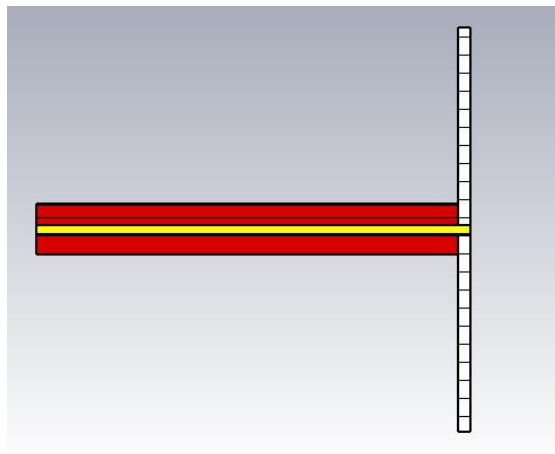
Figura A.2. Método 2. a) Cara frontal, b) Cara posterior y c) Corte transversal



a)



b)



c)

ANEXO B

IMPLEMENTACIÓN

Se implementaron antenas tipo parche cuadradas de 5 cm de lado, con un grosor de 1,6 mm y sustrato dieléctrico FR-4. Se utilizó conectores tipo SMA que tienen una impedancia característica de 50Ω . En la Figura B.1 se muestra el acople del conector a la antena, el pin central atraviesa el sustrato y conecta al parche radiante y el cuerpo del conector se cortocircuita con plano de tierra en la cara posterior de la baqueta.

Después de fabricar cada una de las antenas para los puntos de alimentación propuestos en la Tabla 1, se realizó con ayuda del VNA (Vector Network Analyzer) Rohde Schwarz (R&S®) ZVL6 (Rango de frecuencia hasta 6 GHz) las pruebas a cada una de ellas en un rango de frecuencia de 1 a 3 GHz.

A continuación se observan las gráficas de implementación.

Figura B.1. Antena parche implementada. a) vista frontal, b) vista posterior.

