

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**ESTUDIO DE RECONFIGURABILIDAD DE LAS
CARACTERÍSTICAS CIRCUITALES/RADIANTES EN
ESTRUCTURAS DE ANTENAS**

RECONFIGURACIÓN EN POLARIZACIÓN ELÍPTICA

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
TELECOMUNICACIONES**

ESTEBAN DAVID IBARRA BURBANO

esteban.ibarra@epn.edu.ec

HERNÁN VINICIO BARBA MOLINA

hernan.barba@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2023

CERTIFICACIONES

Yo, Esteban David Ibarra Burbano, declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



Esteban David Ibarra Burbano

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Esteban David Ibarra Burbano, bajo mi supervisión.



Hernán Vinicio Barba Molina

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Esteban David Ibarra Burbano



Hernán Vinicio Barba Molina



DEDICATORIA

Dedico el trabajo que se presenta a continuación a la mejor guía que alguna vez pude tener, al faro que me encaminó hacia la luz, al amigo que siempre confió en mí, al sabio maestro, a mi abuelito Campo Elías Burbano Báez. Por ser el padre que nunca tuve, por creer en aquellos sueños que parecían tan lejanos, por convertirme en un gran ser humano, por ser mi compañía durante muchos años, por los discursos y los consejos, por los abrazos, los chistes y las sonrisas. Desearía que aún estuvieses conmigo y que vieras el fruto de todos tus esfuerzos. Prometo seguir esforzándome por ser mejor y hacerte sentir orgulloso, para que allá en la eternidad tu sonrisa me ilumine.

Descansa tranquilo, no tengo miedo porque los que amamos siguen aquí conmigo.

Guarda un lugar para mí porque tan pronto como termine estaré en camino

AGRADECIMIENTO

A mi madre Wilma, a mis abuelitos/padres Campo y María Lidia, y a mi tía Maura. Gracias por todos estos años juntos, por las lecciones, el apoyo y por creer en mí. Son todo lo que necesito y lo más importante en mi vida, la familia que tanto amo y que merece lo mejor de este mundo.

A mis primos por las sonrisas y los juegos, y a mis tíos por tantas veces hacerme sentir parte de su familia.

A los amigos que tuve durante este largo camino, en especial a los que aún siguen conmigo. Gracias por ser mis hermanos y hermanas, por hacerme reír siempre que lo necesité, por el apoyo, por hacer que todo el dolor que sentía se hiciera más pequeño con su compañía. La vida duele menos con amigos.

Al Dr. Hernán Barba, director de este trabajo, por dedicar su tiempo y conocimiento; y más importante aún, por convertirse en un gran amigo.

Finalmente, agradezco a mi gato Haku por acompañarme durante mi época más oscura e iluminar mi vida con sus maullidos, y a mi fallecido perrito Cooper por recibirme siempre con la más inocente alegría y emoción.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3 ALCANCE.....	3
1.4 MARCO TEÓRICO.....	3
1.4.1 POLARIZACIÓN.....	3
1.4.2 RECONFIGURACIÓN.....	8
1.4.3 IMPLEMENTACIÓN DE RECONFIGURACIÓN EN POLARIZACIÓN EN <i>MICROSTRIP</i> [23].....	10
1.4.4 IMPLEMENTACIÓN DE RECONFIGURACIÓN EN POLARIZACIÓN EN <i>PATCH</i> CIRCULAR [12].....	12
2 METODOLOGÍA.....	15
2.1 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA RADIANTE.....	15
2.2 UBICACIÓN DE ALIMENTACIÓN Y RESONANCIA.....	16
2.3 MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE LA ANTENA <i>PATCH</i> CIRCULAR ...	19
2.3.1 RESULTADOS CIRCUITALES.....	20
2.3.2 RESULTADOS RADIANTES.....	21
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	25
3.1 RESULTADOS.....	25
3.1.1 CAMPO ELÉCTRICO LEJANO.....	25

3.1.2	VERIFICACIÓN DE RECONFIGURABILIDAD.....	26
3.1.3	RECONFIGURACIÓN DE POLARIZACIÓN EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN AXIAL Y ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE LA ELIPSE	28
3.1.4	VALIDACIÓN DE RESULTADOS	30
3.2	CONCLUSIONES.....	37
3.3	RECOMENDACIONES	37

RESUMEN

En el presente Trabajo de Integración Curricular se realiza un estudio de reconfigurabilidad de las características circuitales/radiantes en estructuras de antenas. El estudio se centra en la reconfiguración del parámetro de polarización, de tipo elíptica.

El capítulo 1 describe brevemente la teoría relacionada a la reconfiguración de antenas, de modo que, se presentan los conceptos de polarización y reconfiguración. Además, se realiza un breve análisis descriptivo de implementaciones de antenas relacionadas a la reconfiguración en polarización.

En el capítulo 2 se realiza el diseño y modelado de la estructura radiante. Inicialmente se determinan las dimensiones de la estructura, para luego, definir el tipo y la ubicación de la alimentación. Adicionalmente se optimizan los parámetros geométricos para verificar la resonancia a la frecuencia deseada.

El capítulo 3 describe el análisis de resultados de la simulación de la estructura, para lo cual, se verifica el comportamiento de los parámetros radiantes de la estructura y la caracterización de la elipse respecto a la reconfiguración planteada. Adicionalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones del presente proyecto.

PALABRAS CLAVE: polarización, elipse, reconfiguración, *patch*, frecuencia, directividad, relación axial, inclinación.

ABSTRACT

This work presents a reconfigurability study about the circuit/radiating characteristics in antenna structures. The study emphasizes on the polarization parameter's reconfiguration, specifically on elliptic type polarization.

Chapter 1 briefly describes the previous antenna reconfiguration theory; therefore, the concepts of polarization and reconfiguration are presented. In addition, a brief descriptive analysis of previous implementations is shown.

Chapter 2 presents the design and modeling of the radiation structure. The dimensions are determined, and then, the type and location of the feed is defined. Additionally, geometrical parameters are optimized to verify resonance at the desired frequency.

Chapter 3 describes the analysis of the simulation's results, where the behavior of the radiant parameters and the characterization of the ellipse is verified in relation to the proposed reconfiguration. Finally, conclusions and recommendations of the project are depicted.

KEYWORDS: polarization, ellipse, reconfiguration, patch, frequency, directivity, axial ratio, tilt.

1 INTRODUCCIÓN

La modernidad propia de la época contemporánea aunada a los exponenciales avances tecnológicos que ésta ha traído consigo, han permitido reducir las barreras comunicativas que por tanto tiempo han distanciado a continentes, países e incluso ciudades [1]. Es así como en los últimos años se ha tornado prioritaria la búsqueda de formas más eficientes de manejar la información, especialmente en términos de su emisión, transporte y llegada.

En este sentido, se ha definido la transmisión/recepción de las comunicaciones en dos grandes grupos: la tecnología cableada y la inalámbrica. Generalmente, la solución óptima para comunicación en áreas extensas y/o con gran cantidad de usuarios es la tecnología inalámbrica considerando que ésta no requiere de un medio físico, sino que, por el contrario, permite el libre movimiento de los usuarios dentro del rango de acceso a la red (lo que resulta imprescindible en comunicaciones móviles), presenta menores costos de mantenimiento e instalación, y otorga una mayor flexibilidad y disponibilidad de acceso [2]. Del mismo modo, parte esencial de las comunicaciones inalámbricas es el uso del espectro electromagnético, en especial aquel asociado a las microondas (a partir de 30 GHz).

Las antenas son sin lugar a duda, una parte esencial en los sistemas de comunicación inalámbrica. Estos dispositivos son los encargados de la conversión de ondas electromagnéticas de medios guiados a un medio no guiado (generalmente aire) y viceversa, para la correspondiente transmisión y recepción de señales [3].

La rápida evolución de las tecnologías inalámbricas implica el desarrollo de antenas que sean capaces de ofrecer una gran cantidad de servicios que en la mayoría de los casos utilizan la misma banda de operación. Es precisamente ésta la razón por la que es necesario encontrar una forma de evitar la interferencia entre aplicaciones que utilizan el mismo rango de frecuencia, manteniendo antenas de tamaño compacto y bajo costo.

En pro de encontrar una respuesta a esta búsqueda de mayor funcionalidad en los sistemas de telecomunicaciones, surge el concepto de reconfigurabilidad. El configurar una antena implica determinar su estructura y parámetros para que opere en una determinada frecuencia y/o polarización. Ahora bien, el cambio de estas características de operación exige una reconstrucción que se ajuste a las nuevas especificaciones, en otras palabras, reconfiguración [4]. La reconfigurabilidad en antenas se logra mediante el cambio exclusivo de una de sus características (sea frecuencia, polarización o patrón de radiación), cambio que se produce alterando el flujo de la corriente de la antena y en consecuencia de sus campos electromagnéticos radiados [5].

Las antenas reconfigurables permiten utilizar ya sea distintos estados de polarización o ajustar el patrón de radiación para evitar interferencias no deseadas. Concretamente la reconfiguración por polarización permite mejorar la capacidad de los sistemas al evitar los efectos de multitrayecto y facilitar una buena adaptación de polarización entre dispositivos [6]. Esta característica es indispensable en comunicaciones satelitales donde impera la necesidad de limitar la atenuación y mantener una alta velocidad [5]. Adicionalmente, un manejo correcto del tipo de polarización resulta también imprescindible en estos entornos, pues una polarización concreta (circular) presenta notables ventajas como la de reducir significativamente el efecto de rotación de Faraday propio de la ionósfera [7]. En general, la literatura muestra que es posible obtener reconfiguración por polarización mediante el uso de meta-superficies [8], la incorporación de elementos reconfigurables en la estructura de la antena [9]–[12], o el uso de redes de alimentación reconfigurables [13]–[15].

El presente proyecto, entonces, se centra en el estudio de reconfigurabilidad de las características circuitales/radiantes en estructuras de antenas en polarización elíptica para lo cual se pretende implementar una estructura radiante que permita la caracterización y análisis de la reconfigurabilidad.

1.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este estudio es:

Estudiar la reconfigurabilidad en términos de polarización elíptica respecto a las características circuitales y/o radiantes en estructuras de antenas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos de este estudio son:

1. Revisar brevemente la teoría relacionada con la reconfiguración de antenas en términos de polarización elíptica y el análisis de implementaciones relacionadas.
2. Diseñar una estructura radiante capaz de modificar la dirección de polarización de su elipse de acuerdo con la alimentación seleccionada desde la fuente.
3. Realizar el análisis de resultados de la simulación de la estructura y la obtención de curvas y/o expresiones que permitan caracterizar el comportamiento de elipses respecto a los cambios de la estructura radiante.

1.3 ALCANCE

El presente proyecto presenta un estudio de la reconfiguración de antenas en términos de polarización elíptica. En este sentido se diseñará una estructura radiante con la ayuda de una herramienta de simulación tridimensional la cual permita identificar cambios en los parámetros de la elipse.

En primer lugar, se revisará la teoría asociada al concepto de reconfiguración de antenas, centrándose en lo relacionado a polarización elíptica; por lo cual, se analizarán implementaciones previas pertenecientes a la literatura científica.

Seguidamente, se diseñará una estructura radiante que exhiba reconfiguración en términos de polarización elíptica. A razón de esto, se presentarán las ecuaciones asociadas al proceso de diseño. La estructura será simulada en el dominio de la frecuencia (método de elementos finitos) con alimentación de tipo coaxial.

Finalmente, se presentará un análisis de los resultados obtenidos de modo que se identifiquen los parámetros de la antena que permiten exclusivamente el cambio de forma de la elipse asociada a su polarización. Para ello se analizará el comportamiento de parámetros propios de la elipse como relación axial, ángulos de inclinación y orientación de rotación.

El presente proyecto no contempla la implementación de un producto final demostrable.

1.4 MARCO TEÓRICO

En esta sección se describe de manera general la polarización elíptica y su manejo mediante el paradigma de reconfiguración. Adicionalmente se presentan diseños relacionados a la implementación de esta configuración en tecnología *microstrip*.

1.4.1 POLARIZACIÓN

Tal como se describió anteriormente, las antenas resultan esenciales para el desarrollo de sistemas de comunicación inalámbricos. Por lo cual se requiere la utilización de parámetros que permitan evaluar el desempeño de éstas, siendo algunos de los principales: patrón de radiación, directividad, ganancia, polarización, impedancia en los terminales, ancho de banda, entre otros [16].

El concepto de polarización de una antena está estrechamente ligado a las ondas electromagnéticas, pues no es más que la polarización de la onda transmitida en una dirección definida por la antena o por la dirección de máxima ganancia [17]. Para una onda electromagnética, la polarización o el plano de polarización está definido por el lugar

geométrico que describe la punta del vector de campo eléctrico tras al menos un ciclo completo.

Por lo general, el vector varía en magnitud y orientación periódicamente en cada ciclo, lo que en el tiempo se traduce en el mapeo de una ruta en un determinado punto de observación paralelo al plano normal a la dirección de propagación. Usualmente se asume que el resultado del mapeo de esta ruta es una elipse, dado que es la relación entre los ejes axiales (elipticidad) la que determina el tipo de polarización. La Figura 1.1 presenta los tres casos de mayor interés de elipticidad que consecuentemente constituyen los tres tipos de polarización: lineal, elíptica o circular [18].

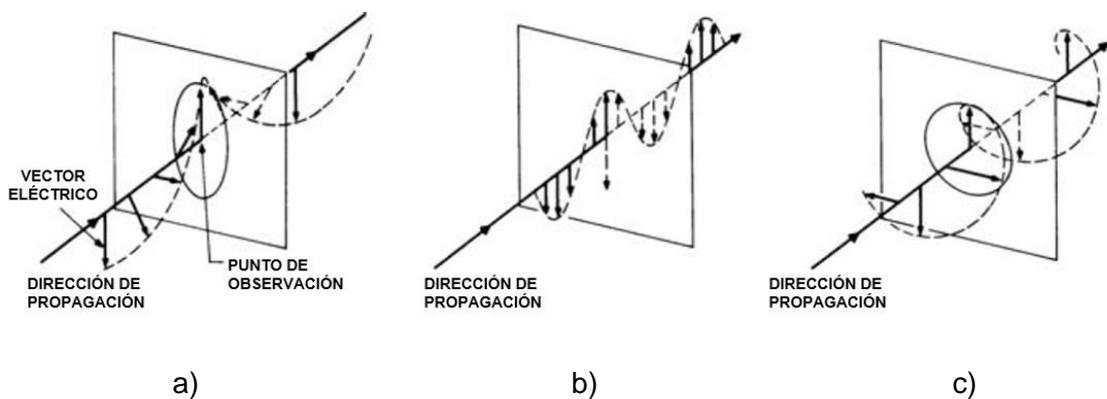


Figura 1.1 Tipos de polarización de la onda electromagnética. a) Polarización elíptica; b) Polarización lineal; c) Polarización circular [18].

Las ondas electromagnéticas pueden presentar un comportamiento no periódico, sin embargo, este no se considera en los análisis de polarización dado que las antenas no son capaces de generarlo [16].

Elección del tipo de polarización

Resulta fundamental poder definir el tipo de polarización generado por una estructura radiante para alcanzar un desempeño óptimo en una determinada aplicación. Esto, debido a que ciertos tipos de polarización presentan ventajas notables en escenarios concretos, por ejemplo, las antenas de polarización circular constituyen un componente clave en sistemas inalámbricos relacionados con comunicaciones satelitales y móviles (esto debido a su eficiencia reduciendo el desvanecimiento y las interferencias de multitrayecto – la señal radiada experimenta reflexión por el suelo u otros objetos circundantes, lo que genera una inversión en la orientación de la polarización, inversión que será rechazada de acuerdo con la orientación definida en la antena receptora) [6].

Adicionalmente, las antenas de polarización circular son inmunes al efecto de rotación de Faraday generado por la ionósfera, mismo que ocasiona pérdidas significativas (evidentes en polarización lineal) dependientes de la latitud, longitud, condiciones de ionósfera y ángulos de elevación y azimut [19]. Este efecto se describe como la rotación gradual del plano de polarización debido a la diferencia de velocidades de fase [20]. La Figura 1.2 muestra el ángulo de giro del plano de polarización ($d\Omega$) respecto a la influencia de los vectores eléctricos de ondas ordinarias (dK_+) y extraordinarias (dK_-), donde éstos representan la longitud de camino de fase angular (número de radianes de fase entre transmisor y receptor).

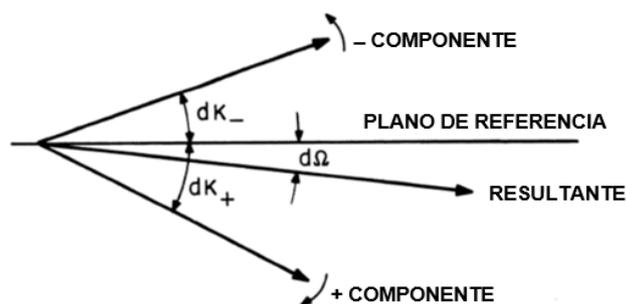


Figura 1.2 Rotación de Faraday [20].

En lo referente a la identificación del tipo de polarización en una estructura radiante, el vector descrito por el campo eléctrico (asociado a la dirección de transmisión la antena y formado por las dos componentes perpendiculares a ésta) en función del tiempo es el que permite determinar el tipo de polarización [21]. Aunque, si bien los tipos de polarización lineal y circular no son más que casos especiales y por tanto son parte de la polarización elíptica, para efectos prácticos se considera usualmente como polarización elíptica a todo aquel resultado que no presenta un comportamiento ni lineal ni circular [17].

Ahora bien, esto implica que para determinar las condiciones necesarias y suficientes que debe cumplir una polarización para denominarse como elíptica, se requiere conocer en qué condiciones se dan los casos especiales de linealidad y circularidad.

Caracterización de la polarización elíptica

Las condiciones que determinan los casos especiales de linealidad y circularidad en lo referente a polarización están asociadas a los valores de magnitud y fase de las dos componentes del vector de campo eléctrico. De modo que: en el caso de la polarización lineal, las magnitudes de los componentes no deben ser necesariamente iguales, sin

embargo, estos deben encontrarse en fase o en contrafase, es decir, que la diferencia de fase entre los componentes responde a la ecuación (1.1),

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = n\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (1.1)$$

mientras que, para la polarización circular, las magnitudes de los componentes deben ser iguales y la diferencia de fase entre estos responde a valores múltiplos de $\pi/2$ (90°). El múltiplo seleccionado permite también determinar si la orientación (dirección de rotación) de la polarización es derecha (CW – *Clock Wise*) o izquierda (CCW – *Counter Clock Wise*). Las ecuaciones (1.2) y (1.3) permiten diferenciar esta orientación [21].

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \text{ para CW} \quad (1.2)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \text{ para CCW} \quad (1.3)$$

Por tanto, las condiciones necesarias y suficientes que deben poseer los componentes del vector de campo son [17]:

- En caso de poseer distinta magnitud, la diferencia de fase debe ser distinta de 0° o múltiplos de 180° para evitar un comportamiento lineal.
- En caso de poseer igual magnitud, la diferencia de fase debe ser distinta de 0° o de múltiplos de 90° para evitar un comportamiento lineal (múltiplos de 180°) o circular (múltiplos impares de 90°).

En general, los tipos de polarización de una antena también pueden ser caracterizados por las propiedades de la elipse presentadas en la Figura 1.3. Es decir, mediante la relación axial (AR – *axial ratio*), el sentido de rotación u orientación, y el ángulo de inclinación [17].

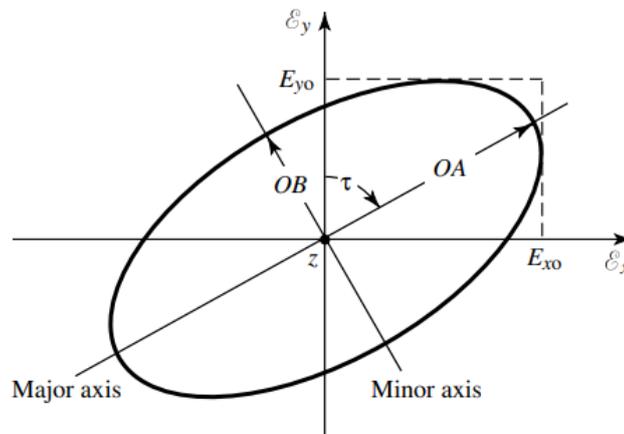


Figura 1.3 Elipse de polarización de una onda electromagnética [17].

La relación axial hace referencia a la relación entre el eje mayor (*major axis*) y el eje menor (*minor axis*), por lo que es representada mediante la ecuación (1.4).

$$AR = \frac{\text{eje mayor}}{\text{eje menor}} = \frac{OA}{OB}, \quad 1 \leq AR \leq \infty \quad (1.4)$$

Los valores de los ejes son obtenidos a partir de las magnitudes de los componentes de campo eléctrico mediante las ecuaciones (1.5) y (1.6)

$$OA = \left[\frac{1}{2} \left\{ E_{x0}^2 + E_{y0}^2 + [E_{x0}^4 + E_{y0}^4 + 2E_{x0}^2 E_{y0}^2 \cos(2\Delta\phi)]^{1/2} \right\} \right]^{1/2} \quad (1.5)$$

$$OB = \left[\frac{1}{2} \left\{ E_{x0}^2 + E_{y0}^2 - [E_{x0}^4 + E_{y0}^4 + 2E_{x0}^2 E_{y0}^2 \cos(2\Delta\phi)]^{1/2} \right\} \right]^{1/2} \quad (1.6)$$

Es precisamente el concepto de relación axial el que permite determinar la forma de la elipse y en consecuencia el tipo de polarización. En este sentido, la relación axial de una onda con polarización circular debe ser igual a la unidad. Sin embargo, la posibilidad de encontrar este resultado en la práctica es extremadamente complicado debido a que siempre existe un grado de elipticidad presente en la experimentación [22]. Para efectos prácticos, se considera generalmente como polarización circular a una relación axial entre 0 y 3 dB. Análogamente, un resultado mayor a 10 dB se considera usualmente como polarización lineal [23].

El sentido de rotación u orientación de la elipse se define por la diferencia de fase entre los componentes del campo. Las ecuaciones (1.7) y (1.8) indican el sentido de rotación de la elipse excluyendo los casos de linealidad y circularidad.

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x \neq \pm \frac{\pi}{2} n > 0, \quad n = 0,1,2, \dots, \text{ para CW} \quad (1.7)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x \neq \pm \frac{\pi}{2} n < 0, \quad n = 0,1,2, \dots, \text{ para CCW} \quad (1.8)$$

El ángulo de inclinación, representado por la letra griega tau (τ), es utilizado para identificar la orientación espacial de la elipse respecto al eje y [17]. La ecuación (1.9) permite determinar el valor de esta inclinación.

$$\tau = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{2E_{x0}E_{y0}}{E_{x0}^2 - E_{y0}^2} \cos(\Delta\phi) \right] \quad (1.9)$$

1.4.2 RECONFIGURACIÓN

En general, el diseño de una antena se basa en una determinada configuración de sus elementos para operar en una frecuencia y polarización deseada. Es precisamente esta configuración la que determina características de la estructura como la forma de la antena, los parámetros del sustrato a utilizar o la ubicación y tipo de alimentación [4].

Así, la reconfiguración es la capacidad de cambiar de forma individual y exclusiva una de las características de operación de la estructura radiante, esto con el objetivo de ajustarse a un sistema cuyos parámetros estén en constante cambio [24]. La designación de cambio individual y exclusiva hace referencia a que solo una de las características de operación (frecuencia, patrón de radiación o polarización) sea reconfigurada mediante un determinado método (eléctrico, óptico o mecánico). Es decir que, si una técnica en concreto permite el cambio de frecuencia, entonces ésta debe cambiar únicamente la frecuencia y mantener los parámetros restantes estables. Bajo esta definición, el desfase de señales entre elementos de un arreglo de antenas que permita *beam forming* o *beam steering* no otorga reconfigurabilidad a una antena [24].

Las antenas reconfigurables pueden ser clasificadas en cuatro categorías [17].

- Reconfiguración en frecuencia, dada por la capacidad de cambiar la frecuencia de operación o de corte mediante sintonización o modificación del coeficiente de reflexión de la estructura.
- Reconfiguración en patrón de radiación, dada por la capacidad de cambiar la forma, dirección o ganancia del patrón de radiación.
- Reconfiguración en polarización, dada por la capacidad de cambiar el tipo de polarización (por ejemplo, de lineal a circular).
- Reconfiguración mixta que, si bien implica la reconfiguración de más de una de las características de operación, cada reconfiguración obedece a una técnica en concreto.

Las técnicas de reconfiguración pueden ser agrupadas en métodos eléctricos basados en la redirección de las corrientes superficiales (mediante el uso de diodos PIN; varactores o RF-MEMS), métodos ópticos basados en la conmutación de elementos fotoconductores, métodos mecánicos basados en el cambio de la estructura de la antena, y métodos basados en la utilización de materiales inteligentes [17].

Reconfiguración en polarización

La reconfiguración en polarización otorga a las antenas la posibilidad de operar en distintas polarizaciones y orientaciones. Esto resulta esencial en dispositivos asociados a comunicaciones móviles y/o satelitales debido a la dificultad que supone lograr una buena adaptación entre antenas utilizando una única polarización, especialmente contemplando los cambios asociados al movimiento [8].

Si bien la solución tradicional para recibir una onda con polarización arbitraria es la utilización de polarización circular, la eficiencia en la recepción no es máxima (por ejemplo, una antena con polarización circular puede recibir con un máximo del 50% de eficiencia a una onda con polarización lineal). La reconfiguración en polarización surge como una forma de mejorar esta eficiencia [14].

La asignación de distintos estados de polarización en una antena también permite evitar interferencia no deseada asociada a aplicaciones que comparten una misma banda de operación [23].

En el caso particular de la polarización elíptica y circular, la reconfiguración en polarización también sugiere el cambio de orientación. Esta posibilidad de radiación en dirección izquierda y derecha permite incrementar la capacidad del sistema, reducir los efectos de multitrayecto provenientes de canales inalámbricos y permitir la codificación por polarización en sistemas digitales [6].

Generación de reconfiguración en polarización elíptica

Los métodos más utilizados en la literatura para obtener reconfiguración en polarización son de tipo eléctrico, mediante la incorporación de elementos reconfigurables [9]–[12] o mediante el uso de redes de alimentación reconfigurables [13]–[15].

Las antenas *microstrip/patch* generalmente utilizan métodos de incorporación de elementos reconfigurables para obtener reconfiguración en polarización debido a la facilidad de integrar conmutadores de RF (como diodos PIN) en estructuras planas. Mientras que, aunque el uso de redes de alimentación reconfigurables implica más consideraciones respecto a la división de potencia, también permite la posibilidad de obtener reconfiguración en patrón de radiación [6].

Si bien el uso de métodos eléctricos para reconfiguración en polarización es el más estudiado, el uso de conmutadores y circuitos de poder adicionales aumenta el volumen y el costo de las antenas. Además, el desempeño de la antena depende de la fiabilidad de

los componentes electrónicos utilizados cuya operación podría generar efectos adversos [8].

A pesar de las desventajas mencionadas, las técnicas de reconfiguración eléctricas resultan mucho más prácticas frente a las mecánicas o las basadas en materiales inteligentes. Los métodos mecánicos presentan casi nulas implementaciones propuestas para reconfiguración en polarización debido al uso de partes movibles, el espacio ocupado por la estructura, y los problemas de sintonización asociados al movimiento [8]. Mientras que, los métodos basados en materiales inteligentes requieren de realizar análisis de parámetros de dispersión y el uso de materiales no convencionales como meta-superficies.

En cuanto a la estructura de la antena, las antenas *microstrip/patch* son de especial interés para comunicaciones inalámbricas debido a sus beneficios en cuanto a tamaño compacto, peso ligero, adaptación a superficies y facilidad de fabricación. Esto sumado a la existencia de varias técnicas que permiten compensar sus limitaciones de ancho de banda [25]. Concretamente, la *patch* circular surge como una geometría compacta y adecuada para obtener reconfiguración en polarización, dada la posibilidad de utilizar una única estructura de antena como un arreglo de dos elementos (*patch + slot, dual feed*). La diversidad en polarización se obtiene mediante el desplazamiento de fase de los modos electromagnéticos coexistentes [26].

Finalmente, la alimentación de la estructura (*microstrip/patch*) puede ser única o dual/múltiple. La alimentación única requiere de ligeras perturbaciones en la estructura de la antena, ligadas a optimizar la posición de la alimentación. Mientras que, la alimentación dual/múltiple requiere de elaborar una red de alimentación, reduciendo el tamaño compacto de la antena [25].

1.4.3 IMPLEMENTACIÓN DE RECONFIGURACIÓN EN POLARIZACIÓN EN MICROSTRIP [23]

La Figura 1.4 presenta una antena diseñada en tecnología *microstrip patch* alimentada por dos líneas *microstrip* opuestas que exhibe reconfiguración de polarización. La estructura presenta cortes biselados en las cuatro esquinas del parche rectangular que permiten la ubicación de diodos PIN cuyo cambio de estados permite obtener distintos tipos de polarización. Adicionalmente se incluyen dos aperturas (*slots*) verticales que permiten mejorar el ancho de banda y la relación axial.

En la Figura 1.4, D1, D2, D3 y D4 representan la ubicación de los diodos PIN, responsables de permitir distintos estados de polarización: circular (CW y CCW) y lineal.

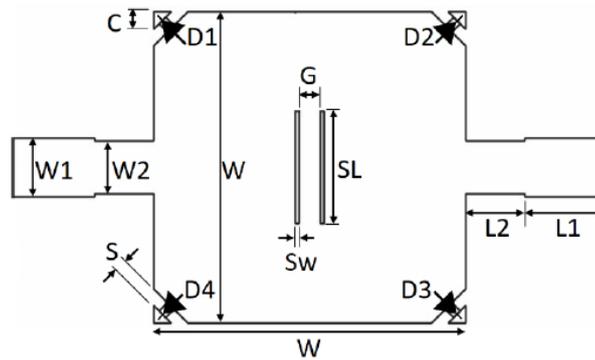


Figura 1.4 Geometría y dimensiones de la antena *microstrip slotted* con dos alimentaciones opuestas y reconfiguración en polarización [23].

La disposición de los cortes y ubicación de los diodos permite obtener dos polarizaciones lineales a 2,5 GHz y cuatro polarizaciones circulares a 2,6 GHz dependiendo de la línea de alimentación activada. A pesar del ligero cambio en frecuencia, la variación del patrón de radiación en las distintas polarizaciones es despreciable.

La Figura 1.5 presenta las mediciones obtenidas en cada una de las configuraciones disponibles. Los resultados exhiben el mismo comportamiento de polarización circular, independientemente de cuál de las dos alimentaciones sea utilizada. Es decir que, la orientación CW (que obedece a la activación de los diodos D2 y D4) o CCW (que obedece a la activación de los diodos D1 y D3) mantiene su comportamiento independientemente de si se utiliza para alimentación la línea izquierda o la derecha.

Sin embargo, si se obtiene un cambio de dirección de corriente en polarización lineal (obtenida tras la activación de todos los diodos PIN). Tal que la corriente se dirige a la derecha al alimentar la estructura desde la izquierda, y viceversa.

Case	1	2	3	4	5	6
Active Feed	Left	Left	Left	Right	Right	Right
Active Diodes	ALL	D1 & D3	D2 & D4	ALL	D1 & D3	D2 & D4
10 dB BW (GHz)	2.28 - 2.77	2.33 - 2.87	2.33 - 2.88	2.28 - 2.77	2.33 - 2.87	2.33 - 2.88
S_{11}/S_{22} (dB)	-23.3614	-23.4117	-22.5469	-25.3701	-24.5271	-25.1040
f_r (GHz)	2.525	2.625	2.65	2.525	2.625	2.65
3 dB AR BW (GHz)	Greater than 32 all over the desired range	2.49 - 2.52	2.49 - 2.51	Greater than 30 all over the desired range	2.49 - 2.52	2.49 - 2.51
AR (dB)		1.7787	2.3112		1.7895	2.0538
AR f_r (GHz)		2.5	2.5		2.5	2.5
Max Gain (dB)	-0.67	0.8774	0.8925	-0.6	0.7734	0.9251
Polarization	Left LP	LHCP	RHCP	Right LP	LHCP	RHCP

Figura 1.5 Resumen de características de la antena para distintos estados de polarización [23].

1.4.4 IMPLEMENTACIÓN DE RECONFIGURACIÓN EN POLARIZACIÓN EN *PATCH* CIRCULAR [12]

La Figura 1.6 presenta el esquema de la estructura de una antena formada por un *patch* circular cuyo radio puede ser reconfigurado para cambiar la forma del patrón de radiación. La estructura incluye segmentos de perturbación que pueden ser o no conectados al radio interno de la estructura mediante diodos PIN, para cambiar el estado de polarización de la antena. Asimismo, la estructura posee dos puntos de alimentación para reducir el tamaño, actuando como un arreglo de dos elementos.

En la Figura 1.6 se observa la ubicación de los puertos de alimentación, de los segmentos de perturbación y de los conmutadores (diodos PIN).

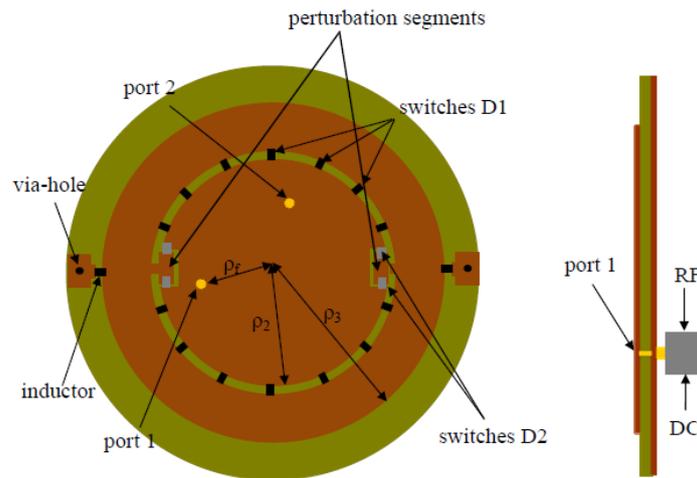


Figura 1.6 Esquema de antena *patch* circular reconfigurable con diversidad en patrón de radiación y de polarización [12].

El diseño presentado posee catorce diodos PIN (*switches D1*) ubicados radialmente en la antena que son utilizados para cambiar el radio del *patch* circular, esto ocasiona la excitación de distintos modos de propagación y consecuentemente diferentes formas de patrón de radiación (reconfiguración en patrón de radiación).

También se cuenta con cuatro diodos PIN (*switches D2*) conectados a dos segmentos de perturbación ubicados dentro del radio interno. Estos permiten obtener desplazamiento de fase de los modos coexistentes en la estructura, lo que posibilita el cambio de estado de polarización (reconfiguración en polarización).

En este sentido, la estructura presentada posee por tanto tres configuraciones.

- Al apagar los conmutadores D1 y D2, se excita el modo electromagnético TM_{21} y se obtiene una polarización elíptica (*mode2 elliptical*).
- Al encender únicamente los conmutadores D2, se excita el modo electromagnético TM_{21} y se obtiene polarización lineal (*mode2*).
- Al encender únicamente los conmutadores D1, se excita el modo electromagnético TM_{31} y se obtiene polarización lineal (*mode3*).

La Figura 1.7 muestra el cambio de polarización entre las configuraciones “*mode2 elliptical*” y “*mode2*” mediante la relación axial, presentada en función del ángulo azimut.

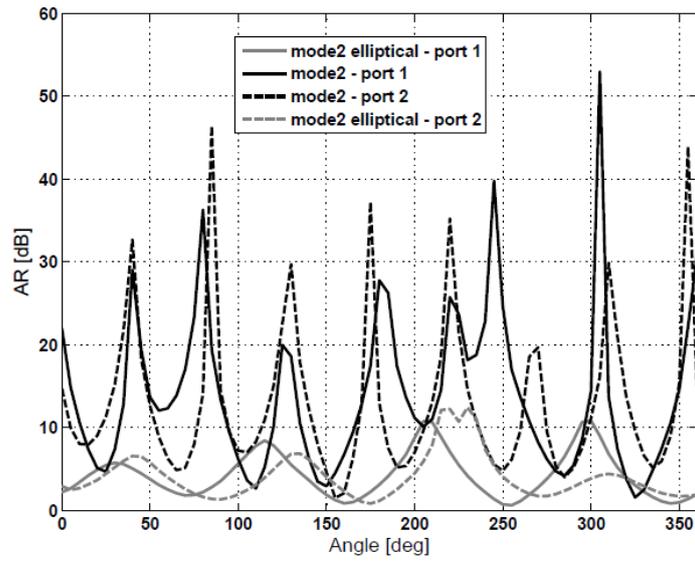


Figura 1.7 Relación axial medida en el plano azimut para las configuraciones “*mode2*” y “*mode2 elliptical*” para dos puertos de alimentación [12].

2 METODOLOGÍA

En esta sección se realiza un estudio de la reconfiguración de antenas en lo referente a polarización elíptica, para lo cual se presenta el diseño de una estructura radiante que permita identificar cambios en los parámetros de la elipse.

2.1 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA RADIANTE

En concordancia a lo descrito en la sección 1.4, la estructura radiante que se va a utilizar es una antena tipo *patch* circular. Esto debido a sus ventajas en cuanto a dimensiones, peso y facilidad de construcción. Además, para efectos del estudio resulta más atrayente el análisis del comportamiento de la elipse con relación a la simetría circular (asociada a la distancia radial), en lugar de un *patch* rectangular. En la Figura 2.1 se presenta el esquema general de una *patch* circular implementada en un sustrato de permitividad relativa ϵ_r y de espesor h . El elemento radiante está impreso en forma de círculo de radio a sobre el sustrato mientras que, para cumplir con la estructura *microstrip*, la cara posterior del dieléctrico tiene un plano de masa.

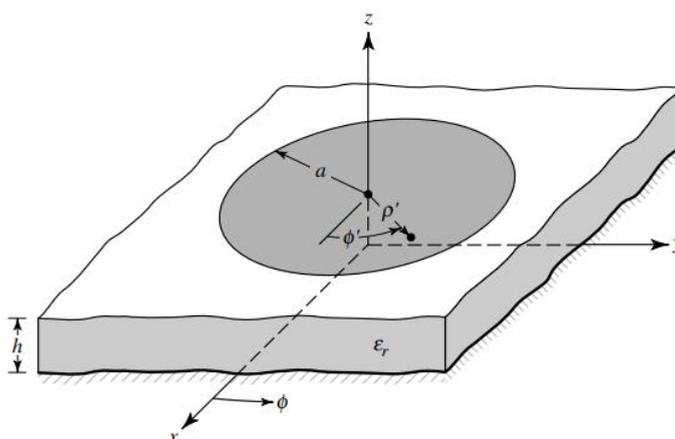


Figura 2.1 Geometría de una antena *patch* circular [17].

El procedimiento de diseño requiere la selección de un sustrato, previo al cálculo de radio de la *patch*. Para este diseño, se utiliza un sustrato Rogers RT/duroid 5880 con una permitividad relativa de 2,2 y un espesor de 0,062" (1,575 mm). El espesor estándar de cobre para este sustrato es de $18 \mu\text{m}$ [27].

La frecuencia de resonancia que se utiliza es de 1,5 GHz, dadas las aplicaciones GPS en la banda L1 (1,575 GHz) y a grandes rasgos, la importancia de la reconfiguración en polarización en sistemas de comunicación satelitales [28].

A partir de estos valores, mediante las ecuaciones (2.1) y (2.2) se calcula el radio de la *patch* circular [17].

$$F = \frac{8,791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.1)$$

$$a = \frac{F}{\left\{1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1,7726 \right] \right\}^{1/2}} \quad (2.2)$$

Donde,

f_r : Frecuencia de operación

ϵ_r : Permitividad relativa del sustrato

F : Expresión auxiliar

h : Espesor del sustrato medido en cm

a : Radio de la *patch* medido en cm

Se obtiene un radio de 3,83 cm, a partir del cual se realiza el modelado de la estructura con la ayuda de la herramienta de simulación tridimensional.

2.2 UBICACIÓN DE ALIMENTACIÓN Y RESONANCIA

Para la alimentación de la estructura radiante se utiliza un cable coaxial. La Figura 2.2 muestra la alimentación por sonda coaxial, de modo que el conductor externo se conecta al plano de tierra y el conductor interno penetra el dieléctrico hasta hacer contacto con la *patch*.

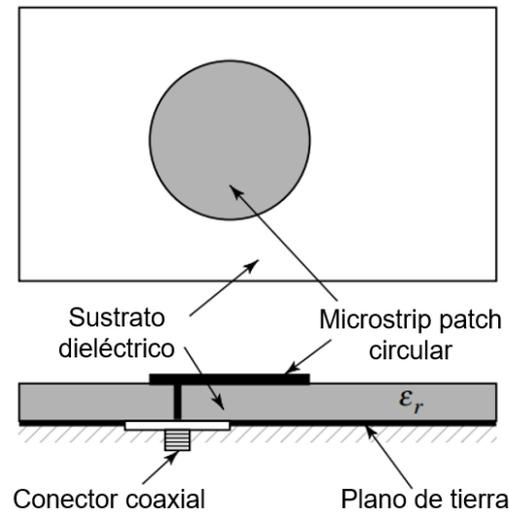


Figura 2.2 Método de alimentación de antena *microstrip* por sonda coaxial [17].

Al permitir la ubicación del coaxial en cualquier lugar de la *patch*, este método facilita la ubicación de un punto de alimentación que permita el acoplamiento con la impedancia de entrada. Además, el plano de tierra aísla la radiación parásita de la alimentación y de la antena, lo que permite un mejor rendimiento [29]. En cuanto a la impedancia de la alimentación coaxial, el valor que se utiliza usualmente es de 50Ω debido a la impedancia de referencia de los sistemas de medición [30].

Para determinar la distancia en la cual se ubicará el coaxial (ρ_0) es necesario determinar la conductancia asociada a las pérdidas por radiación [17]. La Figura 2.3 presenta una gráfica que relaciona esta conductancia de radiación con el radio efectivo de la *patch* (a_e) y la longitud de onda para la frecuencia de resonancia (λ_0).

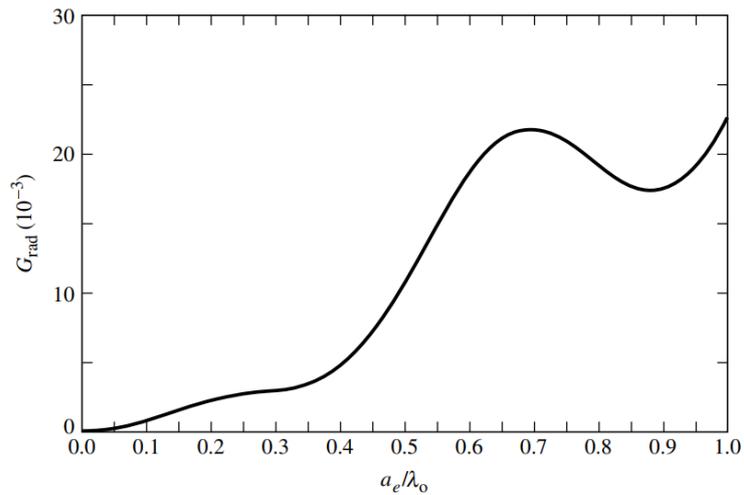


Figura 2.3 Conductancia por radiación versus radio efectivo para una *patch* circular operando en el modo dominante TM_{11} [17].

El radio efectivo de la *patch* se obtiene mediante la ecuación (2.3)

$$a_e = a \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left[\ln \left(\frac{\pi a}{2h} \right) + 1,7726 \right] \right\}^{1/2} \quad (2.3)$$

El resultado es un radio efectivo de 3,95 cm, lo que se traduce en una relación radio efectivo y longitud de onda (a_e/λ_0) de 0,2. Así, la conductancia obtenida mediante de la Figura 2.3 es de 0,0029 S.

La conductancia total está expresada por la ecuación (2.4).

$$G_t = G_{\text{rad}} + G_c + G_d \quad (2.4)$$

Donde,

G_t : Conductancia total

G_{rad} : Conductancia por radiación

G_c : Conductancia por conducción

G_d : Conductancia por dieléctrico

Considerando que los valores de conductancia por conducción y por dieléctrico son mucho menores que la conductancia por radiación, éstos no serán tomados en cuenta.

La resistencia de entrada asociada a cualquier punto de distancia radial igual al radio efectivo se obtiene mediante la ecuación (2.5).

$$R_{in}(\rho' = a_e) = \frac{1}{G_t} \quad (2.5)$$

Se obtiene una resistencia de entrada de 344,83 Ω .

De acuerdo con la impedancia del coaxial de alimentación, la resistencia de entrada asociada a cualquier punto de distancia radial igual al punto de acoplamiento es de 50 Ω , es decir lo descrito en la ecuación (2.6).

$$R_{in}(\rho' = \rho_0) = 50 \Omega \quad (2.6)$$

La relación entre las resistencias de entrada de la alimentación coaxial y el radio efectivo de la *patch* permite definir el valor del punto de acoplamiento (ρ_0). La ecuación que relaciona estas ecuaciones se presenta en (2.7) y (2.8).

$$R_{in}(\rho' = \rho_0) = R_{in}(\rho' = a_e) \frac{J_1^2(k\rho_0)}{J_1^2(ka_e)} \quad (2.7)$$

$$J_1(ka_e) \sqrt{\frac{R_{in}(\rho' = \rho_0)}{R_{in}(\rho' = a_e)}} = J_1(k\rho_0) \quad (2.8)$$

Donde,

k : Número de onda relativo

$R_{in}(\rho' = \delta)$: Resistencia de entrada a una distancia radial δ del centro de la circunferencia

ρ_0 : Distancia del centro de la circunferencia al punto de acoplamiento medido en cm

a_e : Radio efectivo de la *patch* medido en cm

Las expresiones $J_1()$ representan una función de Bessel de primer orden. De modo que, para hallar el valor punto de acoplamiento (ρ_0) es necesario realizar un barrido entre distintos valores hasta encontrar uno que satisfaga la igualdad (2.8). Un valor de ρ_0 igual a 0,0976 conduce a las ecuaciones de (2.9).

$$J_1(k\rho_0) = 0,2216, \quad J_1(ka_e) \sqrt{\frac{R_{in}(\rho' = \rho_0)}{R_{in}(\rho' = a_e)}} = 0,2216 \quad (2.9)$$

Tras verificar que se cumple la igualdad de la ecuación (2.8), se concluye que la alimentación coaxial debe ubicarse a una distancia de 0,98 cm del centro de la circunferencia de la *patch* para cumplir con el acoplamiento de impedancias.

2.3 MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE LA ANTENA PATCH CIRCULAR

La Figura 2.4 muestra la estructura de la antena *patch* implementada en la herramienta de simulación tridimensional, donde ρ_0 es la distancia entre el centro de la circunferencia y la ubicación de la alimentación coaxial y α el ángulo que forma esta distancia con respecto al eje de simetría.

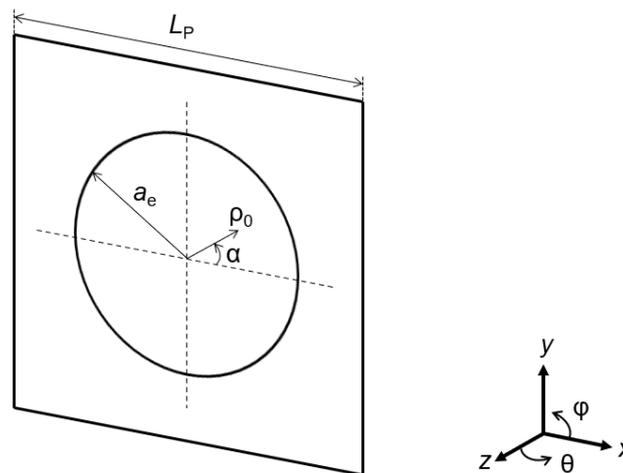


Figura 2.4 Estructura de antena *patch* circular con alimentación coaxial.

2.3.1 RESULTADOS CIRCUITALES

Tras ejecutar un ajuste de valores para mejorar la resonancia en la frecuencia de trabajo, se resumen los parámetros de diseño en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Parámetros de la estructura radiante

Parámetro	Descripción	Valor	Unidad
a_e	Radio de la <i>patch</i>	38,33	mm
L_P	Extensión del sustrato	120	mm
ρ_0	Distancia radial al punto de acoplamiento	0,98	cm

Tras simular la estructura radiante diseñada, se obtiene un valor asociado a reflexión considerablemente bajo ($-34,59$ dB) a 1,5 GHz. La Figura 2.5 verifica la resonancia en la frecuencia de operación.

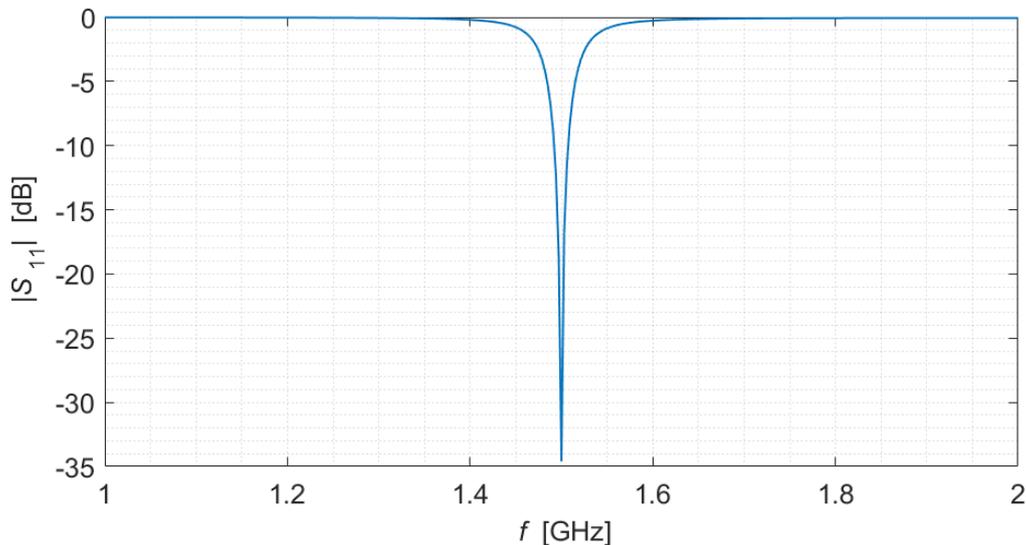
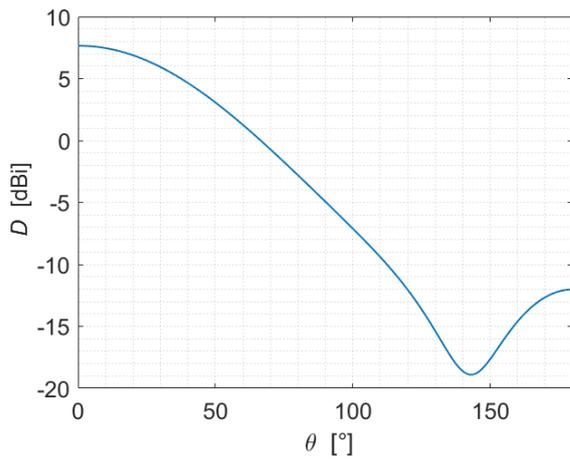


Figura 2.5 Magnitud del parámetro S_{11} de antena *patch* circular con alimentación coaxial.

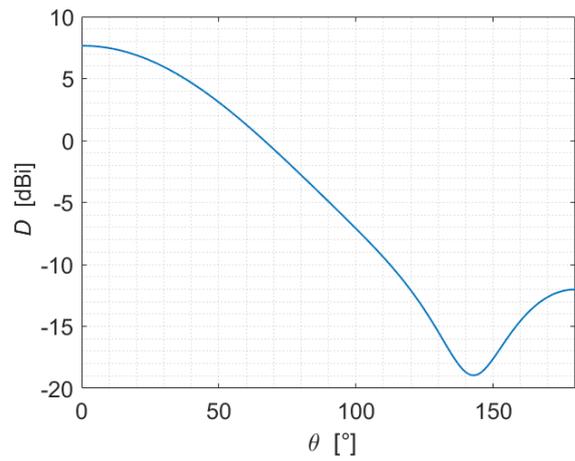
2.3.2 RESULTADOS RADIANTES

Las características radiantes se obtienen para un ángulo de alimentación coaxial (α) de 45° y una distancia radial $\rho_0 = 0,98$ cm.

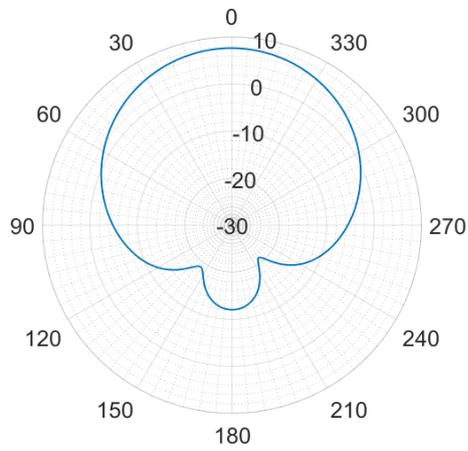
La Figura 2.6 y la Figura 2.7 presentan los valores de directividad y ganancia, respectivamente. Los valores son presentados en gráficas rectangulares (planos XZ y YZ) y polares.



a)

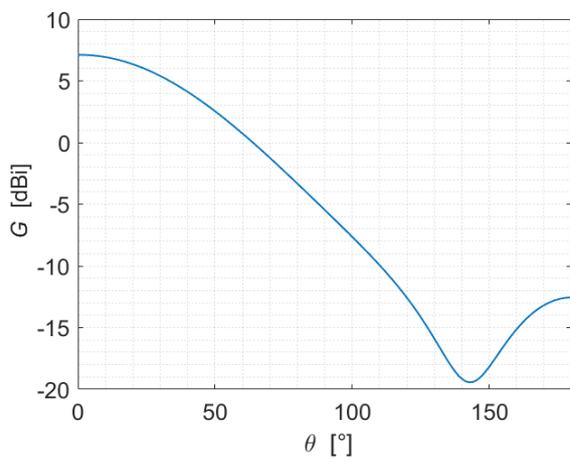


b)

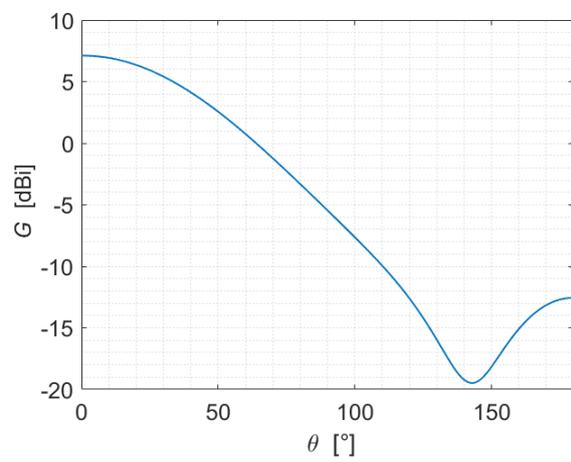


c)

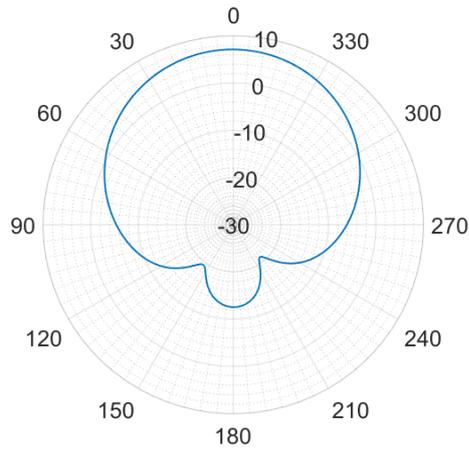
Figura 2.6 Directividad medida en $\alpha = 45^\circ$. a) Plano XZ; b) Plano YZ, c) Polar.



a)



b)



c)

Figura 2.7 Ganancia medida en $\alpha = 45^\circ$. a) Plano XZ; b) Plano YZ, c) Polar.

En la dirección de máxima propagación ($\Theta = 0^\circ$) los valores de directividad y ganancia son 7,65 dBi y 7,12 dBi respectivamente, lo que implica una eficiencia de radiación de $-0,53$ dB (88,51%). Lo anterior corrobora que los resultados obtenidos concuerdan con los valores típicos en este tipo de estructuras [17].

Para caracterizar el comportamiento de la polarización, se utilizan los parámetros de la caracterización de la elipse. La Figura 2.8 muestra la elipse de polarización resultante, obtenida a partir de los valores de eje mayor (OA), eje menor (OB) y ángulo de inclinación (τ).

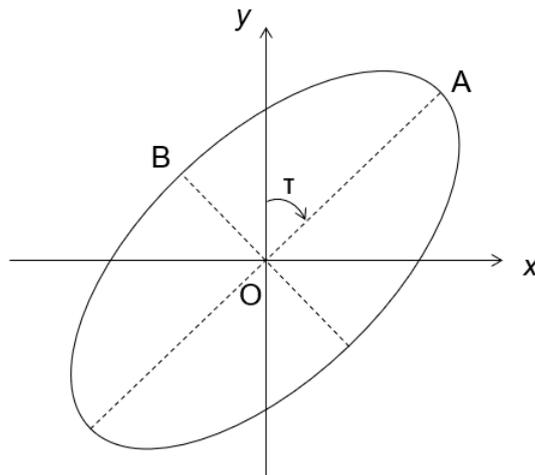


Figura 2.8 Elipse de polarización obtenida con sonda coaxial en $\rho_0 = 0,98$ cm y $\alpha = 45^\circ$.

La elipse resultante tiene una relación axial de 6,06 dB. Este valor verifica que la polarización no es de tipo circular (0 a 3 dB) ni lineal (superior a 10 dB). Adicionalmente, se obtiene un ángulo de inclinación de $45,91^\circ$ respecto al eje mayor.

Finalmente, el valor de diferencia de fases de los componentes eléctricos tiene un valor inferior a 180° , lo que indica que el sentido de rotación es CW.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo se presentarán los resultados, conclusiones y recomendaciones derivadas del Trabajo de Integración Curricular.

3.1 RESULTADOS

Para analizar el comportamiento de la estructura radiante se caracteriza el comportamiento de la polarización en distintas posiciones angulares de la alimentación coaxial. La Figura 3.1 ilustra la curva de posiciones angulares en las cuales se desplazará la alimentación para obtener los valores de los componentes de campo eléctrico en magnitud y fase medidos en campo lejano, a partir de los cuales se caracteriza el comportamiento de una elipse.

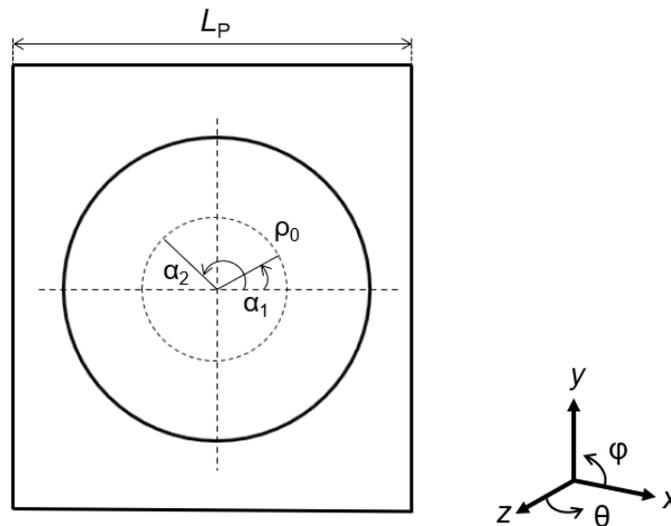
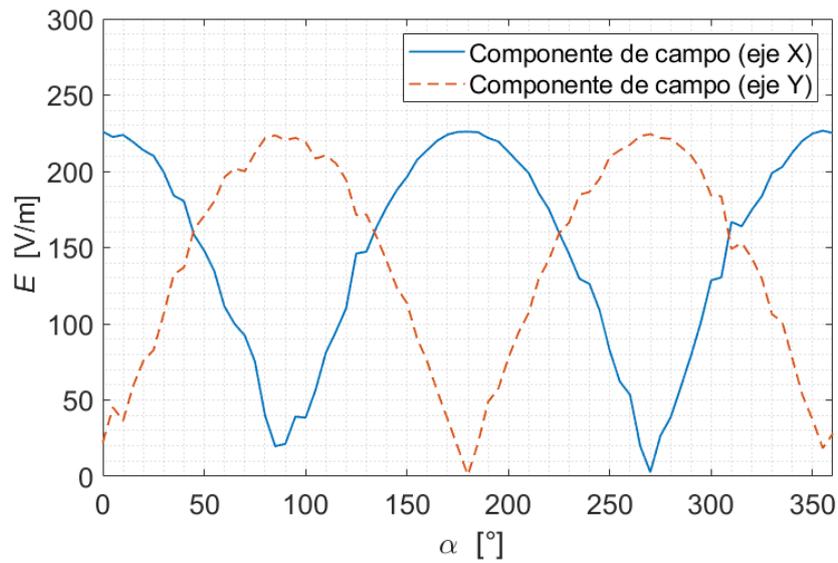


Figura 3.1 Ejemplo de dos posiciones angulares (α_1 y α_2) para la ubicación de la alimentación coaxial con distancia radial ρ_0 sobre la curva de posiciones (línea entrecortada).

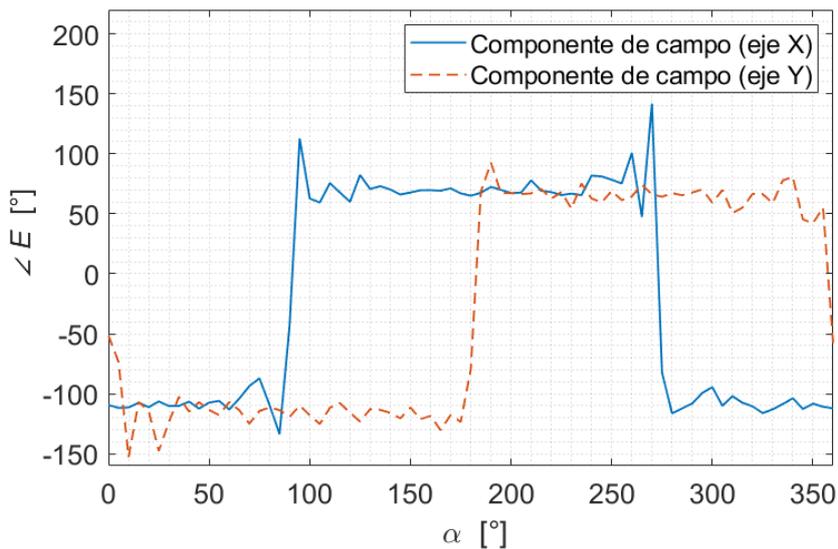
El análisis cubre las distintas posiciones angulares de alimentación alrededor de la circunferencia formada por la distancia radial de acoplamiento (ρ_0). Los datos de simulación se registran para variaciones angulares $\Delta\alpha = 5^\circ$.

3.1.1 CAMPO ELÉCTRICO LEJANO

La Figura 3.2 muestra los componentes del campo eléctrico en magnitud y fase medidos en campo lejano (utilizando monitores de campo lejano) para las distintas posiciones angulares de la alimentación coaxial.



a)



b)

Figura 3.2 Componentes de campo eléctrico en distintas posiciones angulares de alimentación α . a) Magnitud. b) Fase.

3.1.2 VERIFICACIÓN DE RECONFIGURABILIDAD

Tal como se mencionó en la sección 1.4.2, el concepto de reconfigurabilidad implica el cambio individual y exclusivo de una de las características de operación de la estructura radiante. Por tanto, debe verificarse que los parámetros de la antena (a excepción de la polarización) no cambien a medida que el ángulo de alimentación (α) cambia de valor.

La Figura 3.3 muestra el valor de frecuencia para el que se obtiene un valor mínimo de reflexión (frecuencia de resonancia), mismo que ha sido obtenido mediante el análisis de valores mínimos de la curva de la magnitud del parámetro S_{11} en cada una de las distintas posiciones angulares de la alimentación coaxial.

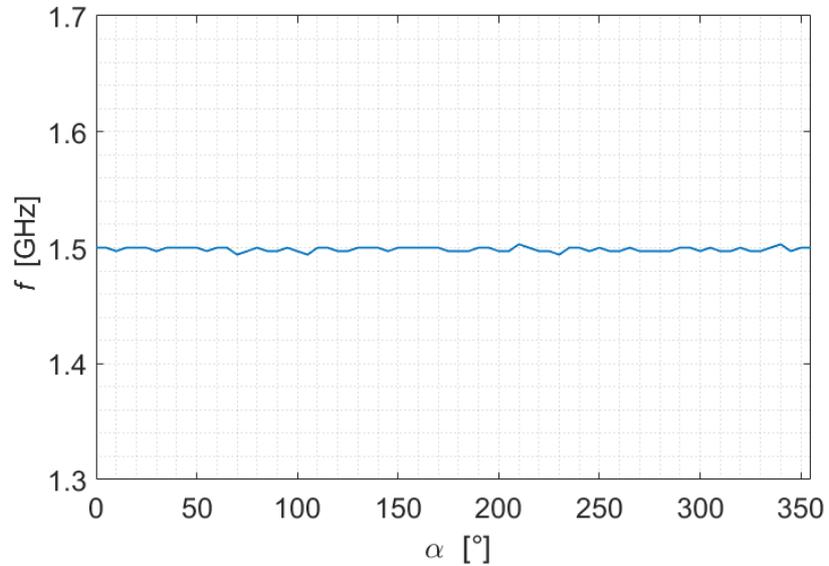


Figura 3.3 Frecuencia de resonancia para distintas posiciones angulares de alimentación (α).

Asimismo, la Figura 3.4 muestra el valor de directividad y ganancia, mismo que ha sido obtenido mediante el análisis del patrón de radiación en cada una de las distintas posiciones angulares de la alimentación coaxial.

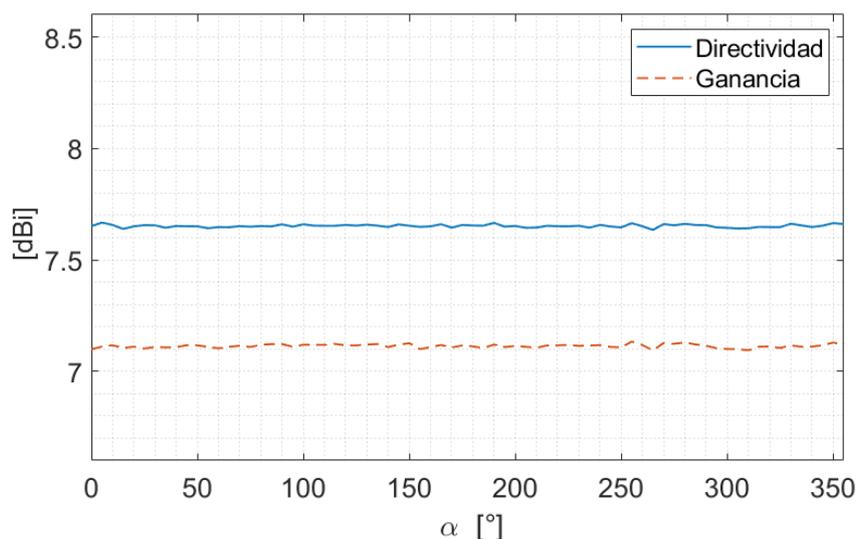


Figura 3.4 Directividad y ganancia para distintas posiciones angulares de alimentación (α).

3.1.3 RECONFIGURACIÓN DE POLARIZACIÓN EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN AXIAL Y ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE LA ELIPSE

Ya que se ha verificado que los parámetros de frecuencia y directividad (consecuentemente también el patrón de radiación) no varían significativamente respecto al ángulo de alimentación de la antena, se analizan los cambios en la polarización. Para ello, se analiza el comportamiento de la polarización mediante la caracterización de las elipses generadas por cada ángulo α según lo señalado en la sección 1.4.1.

La relación axial (*axial ratio*) es obtenida mediante la ecuación (1.4) para cada ángulo de alimentación α . La Figura 3.5 muestra la relación axial en decibelios.

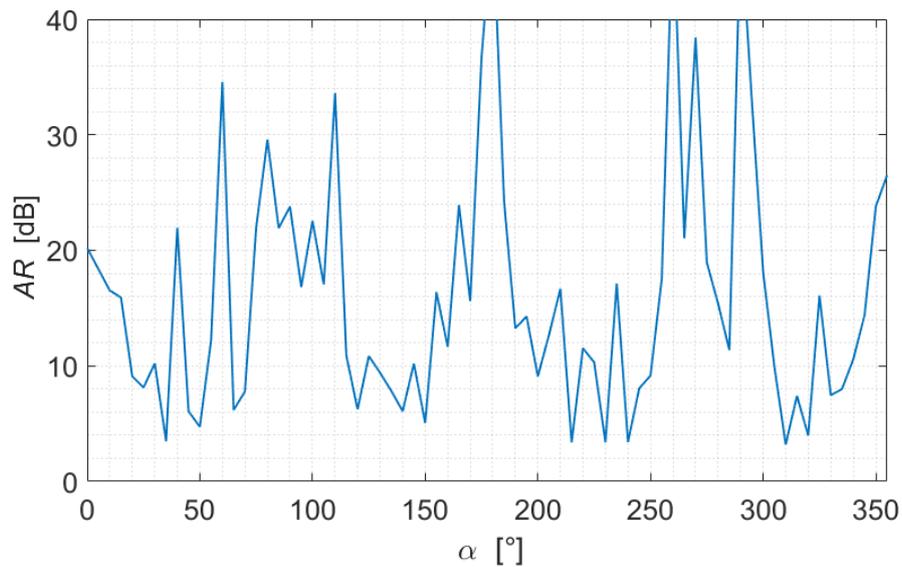


Figura 3.5 Relación axial de la elipse de polarización en distintas posiciones angulares de alimentación (α).

La relación axial permite determinar el tipo de polarización en los distintos ángulos de alimentación. Tal como se mencionó en la sección 1.4.1, para efectos prácticos, la polarización circular responde a valores de relación axial de entre 0 y 3 dB, y resultados mayores a 10 dB responden a polarización lineal. Por tanto, los valores entre 3 dB y 10 dB responden a polarización elíptica.

La Figura 3.5 no permite identificar un comportamiento periódico o un patrón en el que un rango de ángulos de alimentación responda a una determinada polarización. Por el contrario, los cambios abruptos de la gráfica permiten únicamente relacionar determinados ángulos con comportamientos lineales, circulares o elípticos. Si bien existen pequeños intervalos asociados a una polarización en concreto (como es el comportamiento de polarización lineal entre los ángulos de alimentación de 75 y 115° o entre 155° y 195°), la alta variabilidad de la curva otorga un alto número de rangos asociados a distintas polarizaciones, lo que no permite definir fácilmente regiones angulares con determinadas polarizaciones.

A pesar de que la curva no muestra amplios rangos de polarizaciones determinadas (especialmente en el caso circular), ésta puede actuar como guía para aproximar una ubicación de la alimentación.

El ángulo de inclinación (τ), es obtenido mediante la ecuación (1.9) para cada ángulo de alimentación α . La Figura 3.6 muestra la orientación espacial de la elipse respecto al eje y en grados sexagesimales.

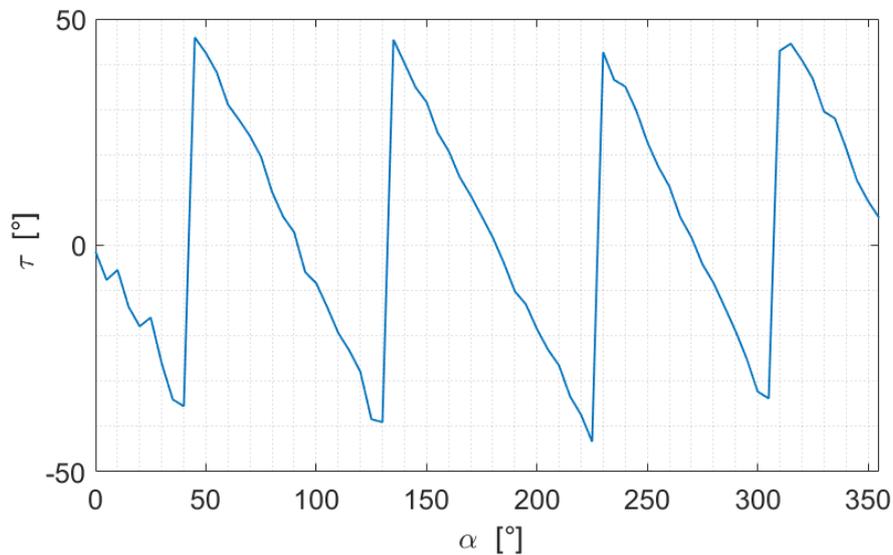


Figura 3.6 Ángulo de inclinación de la elipse de polarización en distintas posiciones angulares de alimentación (α).

La Figura 3.6 muestra un comportamiento periódico (concretamente del tipo diente de sierra). El ángulo de inclinación de la elipse de polarización respecto al eje y varía en un rango determinado (aproximadamente entre -45° y 45°). La curva permite definir determinadas regiones angulares de alimentación que poseen el mismo comportamiento, siendo que para este caso los valores τ se repiten aproximadamente cada 90° .

3.1.4 VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Para verificar la variedad de comportamientos de la elipse de polarización respecto a las distintas posiciones angulares de alimentación, se incluyen dos ejemplos que permitan identificar los cambios de relación axial, ángulo de inclinación y orientación.

Elipse de polarización inclinada hacia la izquierda y rotación CW

La Figura 3.7 muestra el esquema de ubicación de la alimentación coaxial en la *patch*, a un ángulo α de 215° .

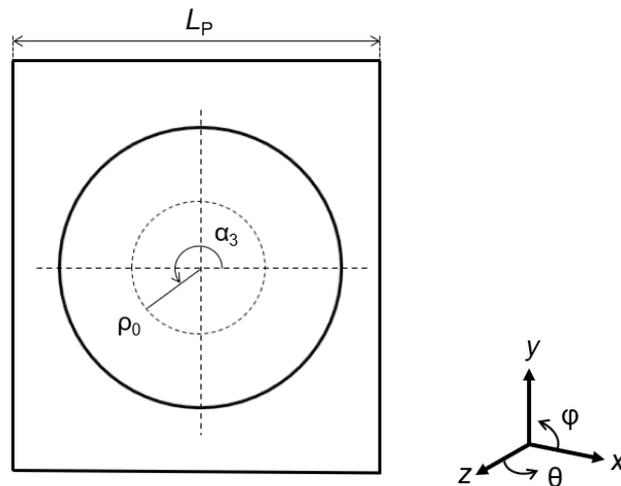


Figura 3.7 Esquema de posición angular ($\alpha_3 = 215^\circ$) para obtener una elipse de polarización inclinada hacia la izquierda y con rotación CW.

La Figura 3.8 verifica la resonancia a la frecuencia de 1,5 GHz y exhibe un valor de reflexión considerablemente bajo ($-29,56$ dB).

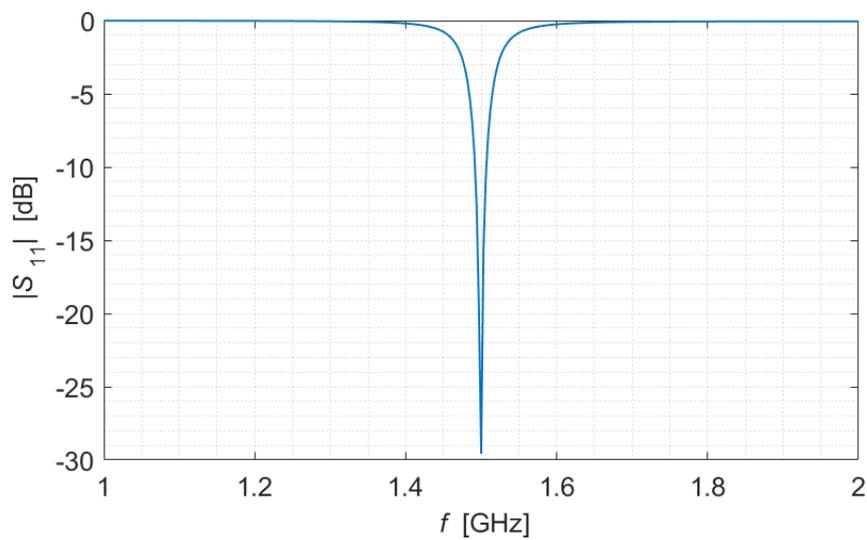
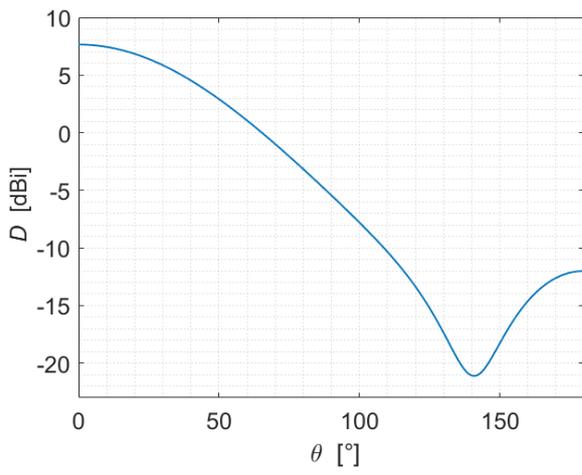
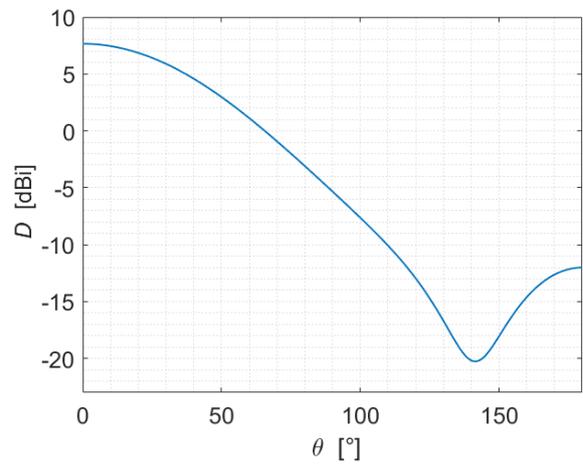


Figura 3.8 Magnitud del parámetro S_{11} de antena *patch* circular con alimentación coaxial para $\alpha_3 = 215^\circ$.

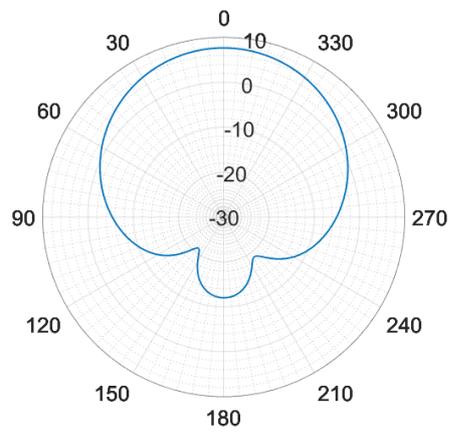
La Figura 3.9 y Figura 3.10 la presentan los valores de directividad y ganancia, respectivamente. Los valores son presentados en gráficas rectangulares (planos XZ y YZ) y polares.



a)

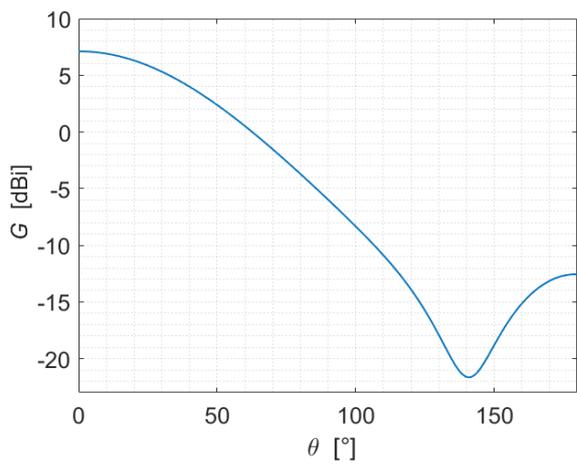


b)

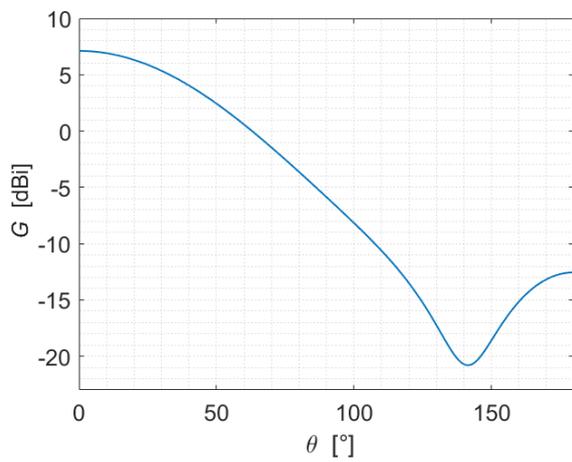


c)

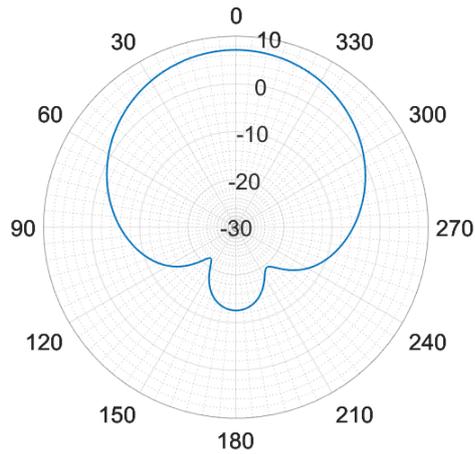
Figura 3.9 Directividad medida en $\alpha = 215^\circ$. a) Plano XZ; b) Plano YZ, c) Polar.



a)



b)



c)

Figura 3.10 Ganancia medida en $\alpha = 215^\circ$. a) Plano XZ; b) Plano YZ, c) Polar.

En la dirección de máxima propagación ($\Theta = 0^\circ$) los valores de directividad y ganancia son 7,65 dBi y 7,12 dBi respectivamente. Los resultados obtenidos concuerdan con los valores típicos.

La Figura 3.11 muestra la elipse de polarización obtenida. Se tiene un valor de relación axial de 3,38 dB (polarización casi circular) y un ángulo de inclinación de $-33,36^\circ$. El valor de diferencia de fases de los componentes eléctricos tiene un valor inferior a 180° , lo que indica que el sentido de rotación es CW.

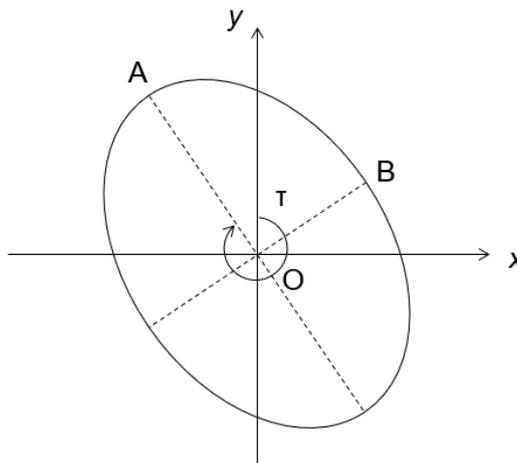


Figura 3.11 Elipse de polarización obtenida a $\alpha = 215^\circ$.

Elipse de polarización inclinada hacia la derecha y rotación CCW

La Figura 3.12 muestra el esquema de ubicación de la alimentación coaxial en la *patch*, a un ángulo α de 90° .

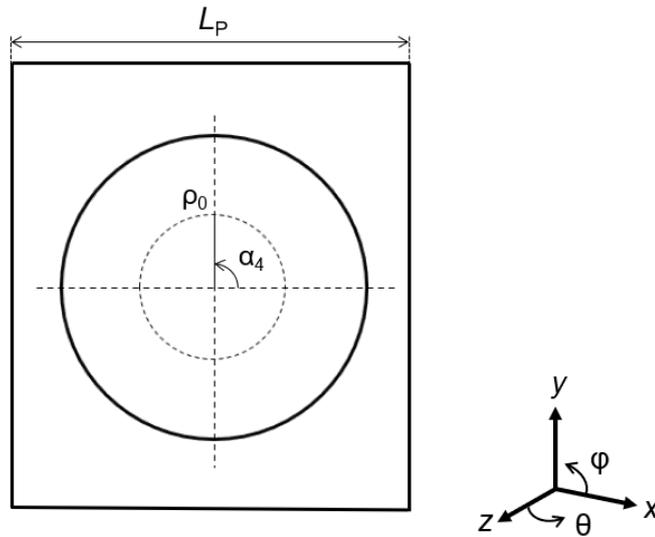


Figura 3.12 Esquema de posición angular ($\alpha_4 = 90^\circ$) para obtener una elipse de polarización inclinada hacia la derecha y con rotación CCW.

La Figura 3.13 verifica la resonancia a la frecuencia de 1,5 GHz y exhibe un valor de reflexión considerablemente bajo ($-24,47$ dB).

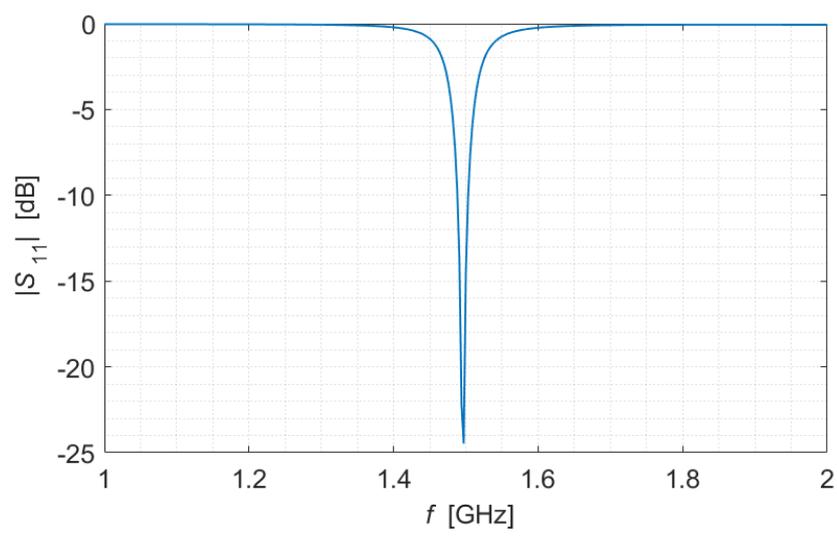


Figura 3.13 Magnitud del parámetro S_{11} de antena *patch* circular con alimentación coaxial para $\alpha_4=90^\circ$.

La Figura 3.14 y Figura 3.15 la presentan los valores de directividad y ganancia, respectivamente. Los valores son presentados en gráficas rectangulares (planos XZ y YZ) y polares.

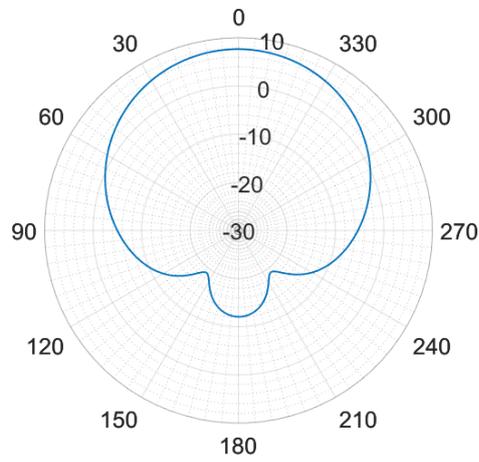
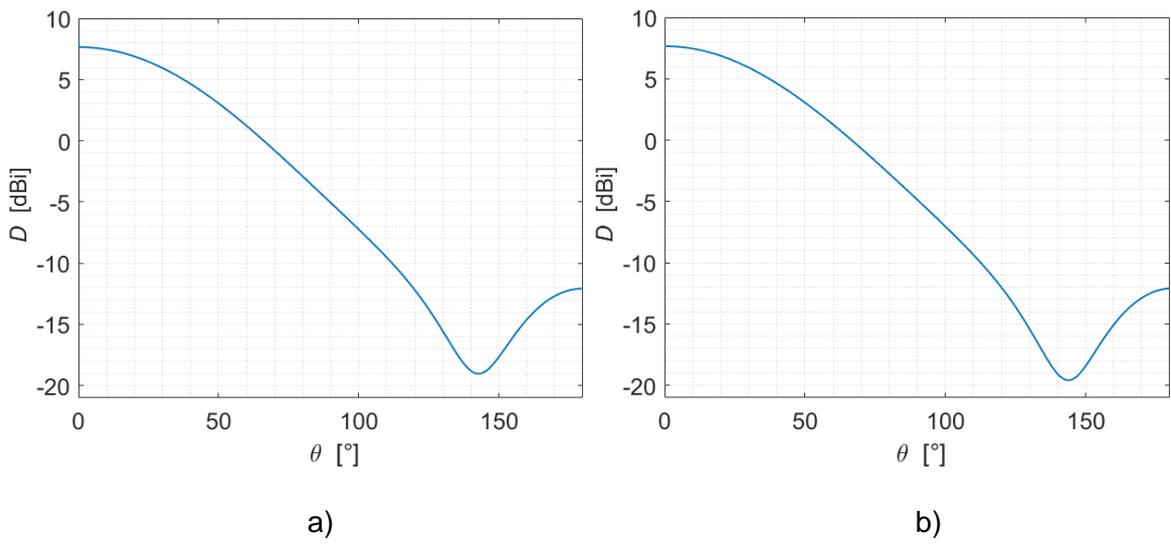
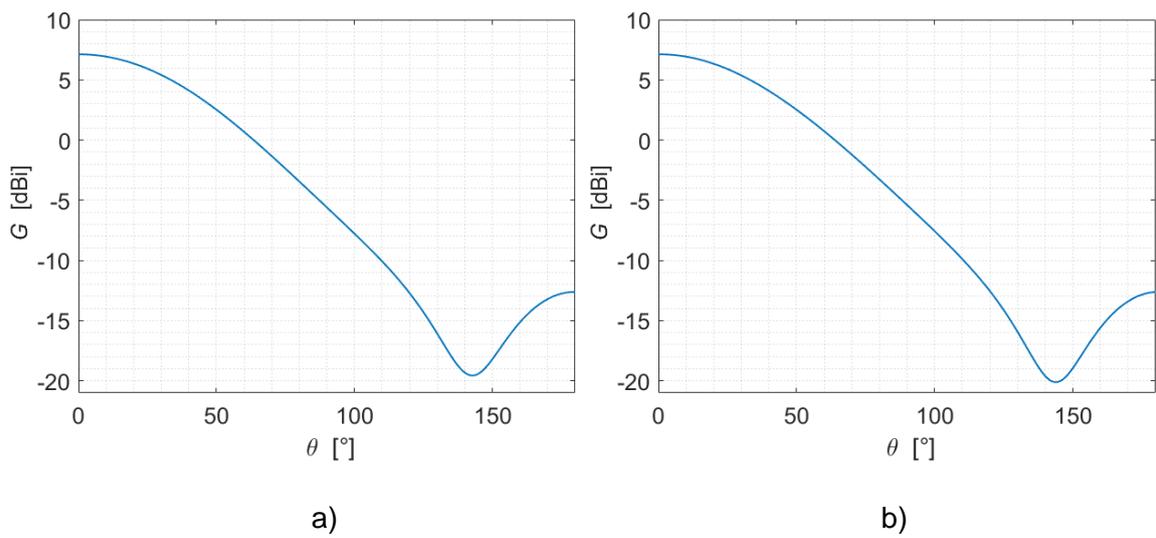
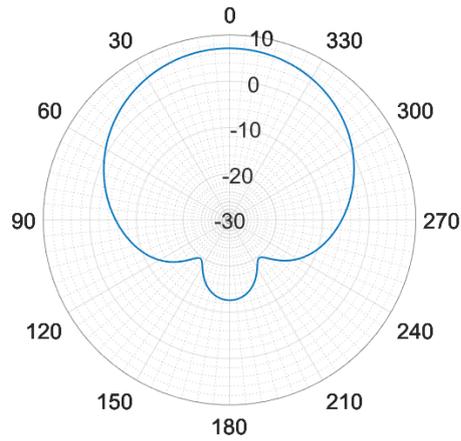


Figura 3.14 Directividad medida en $\alpha = 90^\circ$. a) Plano XZ; b) Plano YZ, c) Polar.





c)

Figura 3.15 Ganancia medida en $\alpha = 90^\circ$. a) Plano XZ; b) Plano YZ, c) Polar.

En la dirección de máxima propagación ($\theta = 0^\circ$) los valores de directividad y ganancia son 7,66 dBi y 7,12 dBi respectivamente. Los resultados obtenidos concuerdan con los valores típicos.

La Figura 3.16 muestra la elipse de polarización obtenida. Se tiene un valor de relación axial de 23,78 dB (polarización lineal) y un ángulo de inclinación de $2,83^\circ$. El valor de diferencia de fases de los componentes eléctricos tiene un valor superior a 180° , lo que indica que el sentido de rotación es CCW.

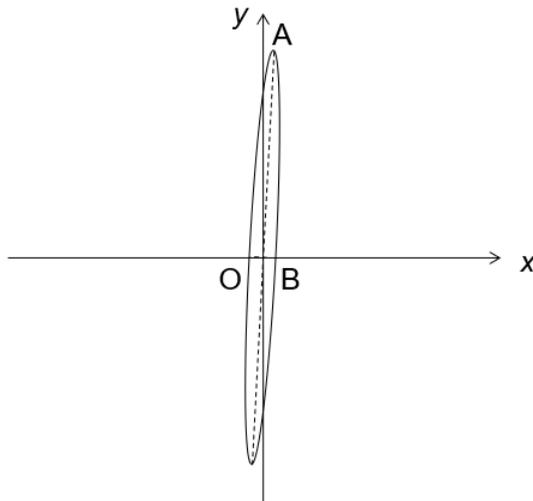


Figura 3.16 Elipse de polarización obtenida a $\alpha=90^\circ$

3.2 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se analiza la reconfiguración de una antena *patch* en polarización elíptica. En primera instancia se ha diseñado una antena *patch* circular en la cual se ha ajustado el punto de alimentación para que la antena sea resonante a la frecuencia de diseño de 1,5 GHz.

Con la ayuda de la herramienta de simulación tridimensional electromagnética fue posible analizar el campo lejano en la dirección de máxima radiación. Este procedimiento permitió la evaluación de la elipse de polarización cuando se desplaza la alimentación del tipo coaxial sin alterar las demás características de la antena tales como directividad, ganancia y resistencia de entrada.

Se describió que el comportamiento del ángulo τ (inclinación de la elipse de polarización) varía en rango determinado de -45 y 45° retornando, repitiendo comportamiento cada 90° (cada cuadrante del *patch* circular). Además, se comprobó que el comportamiento de relación axial es aleatorio, y que se presentan únicamente polarizaciones lineales, elípticas y quasi-circulares, es decir, una relación axial muy cercana a los 3 dB.

Se concluye con el presente estudio que sí es posible la reconfiguración de polarización elíptica por medio de desplazamiento de la alimentación, en un elemento radiante tipo *patch* circular.

3.3 RECOMENDACIONES

Al momento de realizar las mediciones de las dos componentes de magnitud y fase de campo eléctrico, es necesario que las sondas de prueba o *probes* se encuentren ubicadas en campo lejano y que sean configuradas como tal.

Así mismo, se recomienda verificar el formato de los resultados de fase. Éste, por lo general presenta una *phase wrap* de $-180/180^\circ$. La configuración que debe ser seleccionada para identificar fácilmente los resultados es *raw* o $0/360^\circ$.

Para futuros trabajos se recomienda verificar el comportamiento que presenta la estructura *patch* circular para doble alimentación coaxial, de manera que se obtenga curvas de comportamiento para distintas separaciones angulares de coaxial a distintas fases.

Se recomienda analizar la reconfiguración de polarización elíptica en diferentes tipo de radiadores tales como *patch* rectangular con perturbaciones, en estructuras tridimensionales tales como las antenas *horn* o el comportamiento de la polarización en

estructuras que exhiban un gran ancho de banda, como por ejemplo combinaciones de estructuras tipo Vivaldi.

Finalmente, se sugiere la construcción de un prototipo a manera de prueba de concepto para que se verifique el análisis aquí descrito de la reconfiguración de polarización elíptica en una cámara anecoica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. A. Huurdeman, *The worldwide history of telecommunications*. John Wiley & Sons, 2003.
- [2] S. P. Ramalingam and P. K. Shanmugam, "A Comprehensive Review on Wired and Wireless Communication Technologies and Challenges in Smart Residential Buildings," *Recent Advances in Computer Science and Communications (Formerly: Recent Patents on Computer Science)*, vol. 15, no. 9, pp. 1140–1167, 2022.
- [3] C. A. Balanis, "Antenna theory: A review," *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, no. 1, pp. 7–23, 1992.
- [4] R. L. Haupt and M. Lanagan, "Reconfigurable antennas," *IEEE Antennas Propag Mag*, vol. 55, no. 1, pp. 49–61, 2013.
- [5] C. G. Christodoulou, Y. Tawk, S. A. Lane, and S. R. Erwin, "Reconfigurable antennas for wireless and space applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 7, pp. 2250–2261, 2012.
- [6] W. Lin and H. Wong, "Wideband circular polarization reconfigurable antenna," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 63, no. 12, pp. 5938–5944, 2015.
- [7] S. S. Gao, Q. Luo, and F. Zhu, "Introduction to circularly polarized antennas," 2014.
- [8] H. L. Zhu, S. W. Cheung, X. H. Liu, and T. I. Yuk, "Design of polarization reconfigurable antenna using metasurface," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 62, no. 6, pp. 2891–2898, 2014.
- [9] T. Song, Y. Lee, D. Ga, and J. Choi, "A polarization reconfigurable microstrip patch antenna using PIN diodes," in *2012 Asia Pacific Microwave Conference Proceedings*, 2012, pp. 616–618.
- [10] N. H. Noordin, W. Zhou, A. O. El-Rayis, N. Haridas, A. T. Erdogan, and T. Arslan, "Single-feed polarization reconfigurable patch antenna," in *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, 2012, pp. 1–2.
- [11] J.-S. Row and M.-C. Chan, "Reconfigurable circularly-polarized patch antenna with conical beam," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 58, no. 8, pp. 2753–2757, 2010.

- [12] D. Piazza, P. Mookiah, M. D'Amico, and K. R. Dandekar, "Pattern and polarization reconfigurable circular patch for MIMO systems," in *2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation*, 2009, pp. 1047–1051.
- [13] K. Boonying, C. Phongcharoenpanich, and S. Kosulvit, "Polarization reconfigurable suspended antenna using RF switches and PIN diodes," in *The 4th Joint International Conference on Information and Communication Technology, Electronic and Electrical Engineering (JICTEE)*, 2014, pp. 1–4.
- [14] H. H. Tran, N. Nguyen-Trong, T. T. Le, A. M. Abbosh, and H. C. Park, "Low-profile wideband high-gain reconfigurable antenna with quad-polarization diversity," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 66, no. 7, pp. 3741–3746, 2018.
- [15] H. Al'issat, L. Cirio, M. Grzeskowiak, J.-M. Laheurte, and O. Picon, "Reconfigurable circularly polarized antenna for short-range communication systems," *IEEE Trans Microw Theory Tech*, vol. 54, no. 6, pp. 2856–2863, 2006.
- [16] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, *Antenna theory and design*. John Wiley & Sons, 2012.
- [17] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, 2015.
- [18] J. L. Volakis, *Antenna engineering handbook*. McGraw-Hill Education, 2007.
- [19] E. Brookner, W. M. Hall, and R. H. Westlake, "Faraday Loss for L-Band Radar and Communications Systems," *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, vol. AES-21, no. 4, pp. 459–469, 1985, doi: 10.1109/TAES.1985.310634.
- [20] K. Davies, *Ionospheric radio propagation*, vol. 80. US Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1965.
- [21] D.-G. Fang, *Antenna theory and microstrip antennas*. CRC Press, 2017.
- [22] H. J. Visser, *Antenna theory and applications*. John Wiley & Sons, 2012.
- [23] Z. I. Saleh, M. Y. Al-Mallah, and Y. S. Faouri, "Polarization Reconfigurable Microstrip Slotted Antenna with Two Opposite Feeds," *Proceedings - 2019 IEEE 1st Global Power, Energy and Communication Conference, GPECOM 2019*, pp. 15–18, Jun. 2019, doi: 10.1109/GPECOM.2019.8778489.
- [24] J. T. Bernhard, "Reconfigurable antennas," *Synthesis lectures on antennas*, vol. 2, no. 1, pp. 1–66, 2007.

- [25] M. Sahal and V. N. Tiwari, "Review of Circular Polarization Techniques for Design of Microstrip Patch Antenna," *Proceedings of the International Conference on Recent Cognizance in Wireless Communication & Image Processing*, pp. 663–669, 2016, doi: 10.1007/978-81-322-2638-3_74.
- [26] D. Piazza, P. Mookiah, M. D'Amico, and K. R. Dandekar, "Experimental analysis of pattern and polarization reconfigurable circular patch antennas for MIMO systems," *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 59, no. 5, pp. 2352–2362, Jun. 2010, doi: 10.1109/TVT.2010.2043275.
- [27] "RT/duroid® 5880 Laminates - Rogers Corporation." <https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/rt-duroid-laminates/rt-duroid-5880-laminates> (accessed Dec. 06, 2022).
- [28] O. P. Falade, M. U. Rehman, Y. Gao, X. Chen, and C. G. Parini, "Single feed stacked patch circular polarized antenna for triple band GPS receivers," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 60, no. 10, pp. 4479–4484, 2012, doi: 10.1109/TAP.2012.2207354.
- [29] S. S. Chakravarthy, N. Sarveshwaran, S. Sriharini, and M. Shanmugapriya, "Comparative study on different feeding techniques of rectangular patch antenna," *IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks, WOCN*, vol. 2016-November, Nov. 2016, doi: 10.1109/WOCN.2016.7759032.
- [30] M. Randus and K. Hoffmann, "A method for direct impedance measurement in microwave and millimeter-wave bands," *IEEE Trans Microw Theory Tech*, vol. 59, no. 8, pp. 2123–2130, Aug. 2011, doi: 10.1109/TMTT.2011.2141148.