

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y  
ELECTRÓNICA**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ARREGLO DE  
ANTENAS CON ALIMENTACIÓN DE AMPLITUD NO  
UNIFORME PARA EL MEJORAMIENTO DEL *SLL*  
ESTUDIO, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ARREGLO  
LINEAL DE RADIADORES EN TECNOLOGÍA IMPRESA PARA  
RADIACIÓN *BROADSIDE* Y ALIMENTACIÓN DE AMPLITUD NO  
UNIFORME PARA LA REDUCCIÓN DE LÓBULOS SECUNDARIOS**

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

**LUIS SEBASTIÁN SANTACRUZ LÓPEZ**

**[luis.santacruz02@epn.edu.ec](mailto:luis.santacruz02@epn.edu.ec)**

**DIRECTOR: HERNÁN VINICIO BARBA MOLINA**

**[hernan.barba@epn.edu.ec](mailto:hernan.barba@epn.edu.ec)**

**DMQ, febrero del 2022**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Luis Sebastián Santacruz López 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.

---

**Luis Sebastián Santacruz López**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Luis Sebastián Santacruz López, bajo mi supervisión.

---

**Hernán Vinicio Barba Molina**  
**DIRECTOR**

## **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.

Luis Sebastián Santacruz López

Hernán Vinicio Barba Molina

## **DEDICATORIA**

Este trabajo se lo dedico a mi familia (Sandy, Luis, Pao y Kevin), que me a brindado su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecer a todas las personas que fueron parte de mí vida en este proceso de formación que culmina de la manera más satisfactoria.

A mis amigos, desde los que tuve la dicha de conocer en el curso propedéutico, hasta las que se fueron sumando de a poco hasta el final de ciclo académico.

A los buenos docentes docente de la Escuela Politécnica Nacional, que me brindaron los conocimientos y destrezas para lograr esta meta en mi vida. En especial el Dr. Hernán Barba, que a sido un excelente tutor académico, y un ejemplo a seguir.

Y a mi familia, que a estado conmigo en cada paso brindándome apoyo emocional, necesario en para siempre avanzar y nunca darse por vencido.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	OBJETIVO GENERAL .....	2
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
1.3	ALCANCE .....	2
1.4	MARCO TEÓRICO .....	3
1.4.1	ARREGLO DE ANTENAS .....	3
1.4.2	IMPLEMENTACIONES DE ARREGLOS DE RADIADORES CON ESQUEMAS DE ALIMENTACIÓN NO UNIFORME .....	7
2	METODOLOGÍA .....	13
2.1	SIMULACIÓN DE CAMPO ELÉCTRICOS LEJANOS EN MATLAB .....	13
2.2	DISEÑO DEL CIRCUITO EN TECNOLOGÍA IMPRESA.....	34
2.3	SIMULACIÓN EN KEYSIGHT® ADS.....	35
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	41
3.1	RESULTADOS.....	41
3.2	CONCLUSIONES .....	44
3.3	RECOMENDACIONES .....	45
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	46
	ANEXOS .....	47

## RESUMEN

El presente trabajo de integración curricular plantea el estudio, simulación, diseño e implementación de un arreglo lineal de antenas con distribución de corriente de amplitud no uniforme, con el objetivo de disminuir la magnitud de los lóbulos secundarios presentes en los diagramas de radiación de este tipo de arreglos.

Para el efecto, se detallan los fundamentos teóricos de los arreglos de antenas con distribución de corriente de amplitud uniforme y no uniforme. Seguidamente, se realizan simulaciones con la ayuda de la herramienta MATLAB, donde se obtienen los valores del *SLL* para cada combinación posible entre esquemas de alimentación (3 esquemas), número de elementos (de 1 a 10), separación entre elementos (de  $0,05\lambda$  a  $0,5\lambda$ ) y diagramas de radiación de diferentes antenas.

Estos resultados permiten hacer un análisis comparativo entre todos los arreglos planteados de antenas, escogiendo así las características adecuadas para el diseño del producto entregable.

Posteriormente, se realiza el diseño del radiador a utilizar el cual es modelado con la ayuda del software Keysight® Advanced Design System. A continuación, se procede con la implementación física del sistema de radiadores, en donde se obtiene datos de la adaptación de los radiadores para verificar la correcta implementación del sistema. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones.

**PALABRAS CLAVE:** diagrama de radiación, *SLL*, antena *patch*, antena dipolo, distribuciones de corriente

## ABSTRACT

This curricular integration work proposes the study, simulation, design, and implementation of a linear array of antennas with non-uniform amplitude current distribution, with the aim of decreasing the magnitude of the secondary lobes present in the radiation diagrams of this type of array.

For this purpose, the theoretical foundations of antenna arrays with uniform and non-uniform amplitude current distribution are detailed. Simulations are then performed with the help of the MATLAB tool, where the SLL values are obtained for each possible combination between power schemes (3 schemes), the number of elements (from 1 to 10), the separation between elements (from  $0.05\lambda$  to  $0.5\lambda$ ) and radiation diagrams of different antennas.

These results allow a comparative analysis between all the proposed antenna arrays, thus choosing the appropriate characteristics for the design of the deliverable product.

Subsequently, the design of the radiator to be used is made and modeled with the help of Keysight® Advanced Design System software. Next, we proceed with the physical implementation of the radiator system, where we obtain data on the adaptation of the radiators to verify the correct implementation of the system. Finally, the conclusions and recommendations are presented.

**KEYWORDS:** radiation pattern, SLL, patch antenna, dipole antenna, current distributions



# 1 INTRODUCCIÓN

En varios sistemas tecnológicos, como sistemas de radar microonda y de onda milimétrica, comunicaciones, etc.; es necesario la adecuación y el control de ciertos parámetros de las antenas utilizadas, como la ganancia, el nivel del lóbulo lateral (SLL – Side-Lobe Level) y directividad [1]. Entre éstos, el SLL es uno de los parámetros más importantes, teniendo estrictos requerimientos de nivel lóbulo lateral en ciertos estándares de comunicaciones inalámbricas [2]. Unos de los métodos para el control del SLL es la utilización de esquemas de alimentación con distribución de amplitud de corriente de alimentación no uniformes, como la binomial, Dolph-Tschebyscheff, triangular o *edge* [3]

El presente Trabajo de Integración Curricular pretende estudiar el comportamiento de diferentes estructuras radiantes por medio de sus diagramas de radiación. Específicamente, se tratarán arreglos lineales de antenas tales como el dipolo de media longitud de onda y la antena *patch* o *microstrip*. Para el análisis se excitarán estas estructuras con distribuciones de alimentación uniforme y no uniforme, para determinar la variación y/o mejora del diagrama de radiación en términos de la relación de lóbulo principal a secundario. Es así como, este estudio permite un análisis comparativo de los valores del SLL obtenidos en los arreglos lineales de radiadores, variando los tipos de antenas utilizadas, el número de elementos que conforman los arreglos y la distancia entre éstos. Al final, se pretende determinar la mejor combinación de estas variables para minimizar los efectos de los lóbulos secundarios en los arreglos lineales de antenas para una eventual posterior implementación física.

En el Capítulo 1 se presenta una breve introducción al presente Trabajo de Integración Curricular que incluye objetivos y alcance. Asimismo, se detallan los fundamentos teóricos necesarios para conseguir los objetivos planteados. Además, se comparan los objetivos, métodos y resultados de tres trabajos presentes en la literatura académica, encaminados hacia el mismo tema de investigación de este trabajo, con el fin de obtener una guía teórica-práctica de los resultados por alcanzar.

El Capítulo 2 presenta la metodología sobre la cual se logra el alcance propuesto. Se muestran diferentes simulaciones teóricas implementadas para el análisis comparativo entre arreglos lineales de antenas, proponiendo una configuración de parámetros específica para su posterior implementación física.

Por último, en el Capítulo 3 se exponen los resultados obtenidos en la implementación física de arreglo lineal de radiadores junto con las conclusiones y recomendaciones derivadas del presente trabajo.

## 1.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo del presente trabajo es

- Realizar el estudio, diseño e implementación de un arreglo lineal de radiadores en tecnología impresa para radiación *broadside* y alimentación de amplitud no uniforme para la reducción de lóbulos secundarios.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos del presente trabajo se detallan en los siguientes puntos:

- Revisar brevemente la teoría relacionada con arreglos lineales con alimentación no uniforme y las implementaciones más relevantes reportadas en la literatura con enfoques similares.
- Simular en MATLAB los diferentes mecanismos de alimentación para tres tipos de antenas: dipolo de media longitud de onda y antena *patch*.
- Realizar el modelamiento y simulación de un elemento radiante en Keysight® ADS.
- Implementar un arreglo de antenas en base al elemento radiante modelado y optimizado.
- Realizar medidas de acoplamiento de impedancia del arreglo construido.

## 1.3 ALCANCE

Como primera fase se realizará una investigación teórica acerca de los arreglos de antenas con distribución de alimentación no uniforme. Este apartado presentará diferentes implementaciones con enfoques similares al proyecto, para tener una guía sobre los resultados a obtener.

Seguidamente, usando el software MATLAB, se realizarán simulaciones de los distintos esquemas de alimentación no uniforme para un arreglo lineal de antenas. En la simulación se estudiará el SLL. Estas simulaciones se realizarán tomando en cuenta dos tipos de antenas: dipolo de media longitud de onda y antena *patch*. Esto permitirá la realización de un análisis comparativo entre los distintos tipos de antenas con el fin de elegir el radiador a ser implementado en el sustrato.

Con la ayuda de la herramienta de simulación Keysight® ADS, se procederá a modelar y simular un radiador elegido en el apartado anterior el cual conformará el arreglo lineal a construirse.

Por último, se implementará el arreglo lineal de radiadores en el sustrato elegido. Como resultados se presentarán medidas de acoplamiento de impedancia usando un analizador vectorial de redes, las cuales se compararán con los datos obtenidos en las simulaciones para un radiador.

## **1.4 MARCO TEÓRICO**

La utilización de un único elemento de radiación en las comunicaciones inalámbricas podría limitar algunas propiedades radiantes que se requieren en determinadas aplicaciones. Usualmente, el diagrama de radiación que se obtiene por un único elemento radiante presenta un lóbulo de radiación amplio lo que conlleva a valores bajos de directividad. Una de las técnicas que permite el incremento de directividad está basada en la relación que ésta tiene con el área efectiva del elemento radiado.

Esto, sin embargo, resulta insuficiente para la manipulación de otros parámetros de radiación. Frecuentemente es necesario que la antena utilizada en los procesos de comunicaciones tenga parámetros específicos de directividad, ángulo de apuntamiento, relación del lóbulo principal al lóbulo secundario, ancho del haz, entre otros.

La manipulación de los parámetros de radiación se puede lograr utilizando un arreglo de antenas, en donde los diagramas de radiación de cada elemento del arreglo se acoplan entre sí dando como resultado un diagrama de radiación que puede diferir del elemento individual usado para formar el arreglo [3].

### **1.4.1 ARREGLO DE ANTENAS**

Un arreglo de antenas es un conjunto de elementos radiantes (de un mismo tipo o de diferentes) excitados simultáneamente, en donde el diagrama de radiación total resulta del acoplamiento de los patrones de radiación de las antenas utilizadas en dicha estructura. Normalmente, y para facilitar el análisis y diseño de estos arreglos, se suelen elegir elementos idénticos para la conformación de estos conjuntos [1], [3].

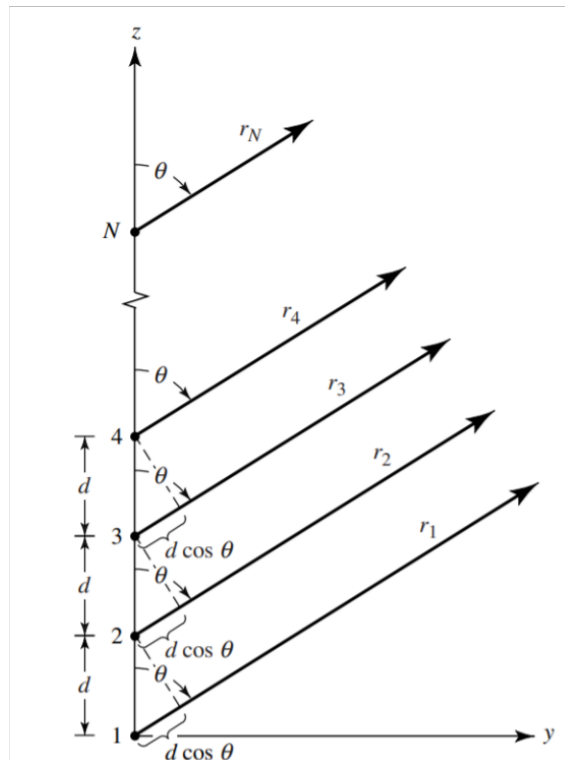
Para la obtención de la función angular que representa el diagrama de radiación total del arreglo de antenas se calcula, en primera instancia, un factor de arreglo (FA) el cual toma en cuenta los radiadores como fuentes isotrópicas. Este factor depende de la amplitud de la corriente y la fase de alimentación de cada elemento individual, de la separación entre elementos y de la cantidad de elementos del arreglo. Si el elemento a utilizar no es isotrópico, el diagrama de radiación de arreglo se obtiene de la multiplicación del patrón de radiación del elemento utilizado por el factor de arreglo previamente conocido [1], [3].

Existen cinco posibles características que, utilizando arreglos de antenas, se pueden modificar referentes a los parámetros de radiación: la configuración geométrica del arreglo, la separación entre elementos, la corriente de excitación de cada elemento, la fase de alimentación de cada elemento y el patrón de radiación propio de cada elemento [1].

La configuración geométrica del arreglo hace referencia a la distribución espacial de los elementos del conjunto de radiadores. Existen varias maneras de distribuir espacialmente a los elementos radiantes (lineal, circular, rectangular, esférico, etc.) [1]. El presente trabajo se centra en el estudio, diseño e implementación de un arreglo lineal de radiadores, por lo que en los apartados siguientes se tratará exclusivamente este tipo de distribución espacial.

### **Arreglo lineal de antenas**

Un arreglo lineal de antenas hace referencia a un conjunto de antenas ubicadas en una única dirección espacial. En estos arreglos se puede manipular la amplitud de corriente y fase de alimentación de los elementos, y la separación entre éstos para modificar el diagrama de radiación resultante. La Figura 1.1 muestra la distribución geométrica de campo lejano de un arreglo de  $N$  elementos de fuentes isotrópicas posicionadas a lo largo del eje  $z$ .

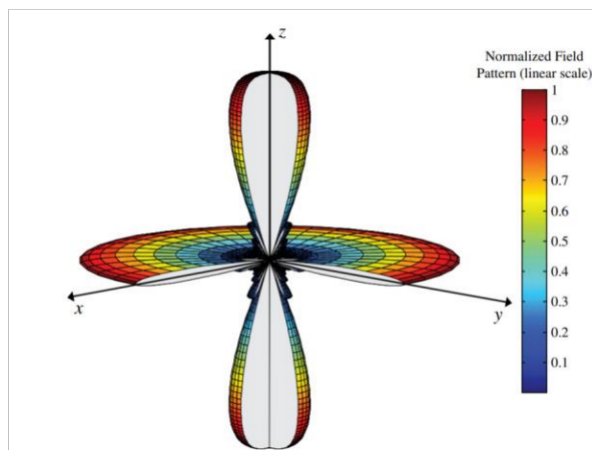


**Figura 1.1** Geometría de campo lejano de un arreglo de  $N$  elementos de fuentes isotrópicas posicionadas a lo largo del eje  $z$  [1].

Ciertas aplicaciones van a requerir que el ángulo de apuntamiento del haz principal del patrón de radiación del arreglo sea normal con respecto a los elementos del conjunto (radiación *Broadside*), y otras aplicaciones van a requerir que el haz este en fase con el eje de ubicación del arreglo (radiación *end-fire*) [1].

Para lograr una radiación del tipo *Broadside* en arreglos lineales de antenas (fuentes isotrópicas) es necesario que todos los elementos de éste tengan la misma fase de excitación, y la separación entre elementos sea diferente de los múltiplos de la longitud de onda de trabajo para prevenir que exista máximos principales en otras direcciones (llamados lóbulos secundarios o *grating lobes*) [1].

Para lograr radiación únicamente de tipo *end-fire*, tomando en cuenta las mismas condiciones anteriormente expuestas, es fundamental que la separación entre elementos sea menor o igual a  $\lambda/2$  (siendo  $\lambda$  la longitud de onda de trabajo del elemento individual). Con espaciamientos mayores a  $\lambda/2$  que sean múltiplos de  $\lambda$  aparecen lóbulos secundarios en la dirección *Broadside* hasta que la distinción entre lóbulos principal y secundarios es imperceptible [1]. La Figura 1.2 presenta un ejemplo de un diagrama de radiación de un arreglo con 10 elementos posicionados sobre el eje  $z$  separados una distancia correspondiente a una longitud de onda en el cual se aprecia la radiación *broadside* (lóculo principal) y *end-fire* (lóculo secundario).



**Figura 1.2** Patrón de radiación de un arreglo Broadside/End-fire [1].

La manipulación de las amplitudes de alimentación de cada elemento individual es una técnica que se utiliza para reducir la amplitud de los lóbulos secundarios o *grating lobes* [1]. Esto se realiza mediante la aplicación de ciertos esquemas de distribución de corriente, entre los cuales se pueden resaltar las siguientes distribuciones: uniforme, binomial, triangular y Dolph-Tschebyscheff [1], [3]. Para el objetivo del presente trabajo se revisará brevemente las distribuciones uniforme, binomial y triangular.

### **Distribuciones de corriente**

Una distribución de corriente hace referencia a la amplitud de corriente con la que cada elemento de un arreglo de radiadores es excitado. A breves rasgos, las distribuciones se pueden dividir en dos: distribución uniforme, distribuciones no uniformes (binomial, triangular, etc.).

- Distribución uniforme

Esta distribución se caracteriza porque todos los elementos del arreglo poseen la misma magnitud de corriente de alimentación. El factor de arreglo que define a esta distribución de alimentación se precisa en la relación dada en la ecuación (1.1).

$$|FA(\Psi)|_{\text{uniforme}} = \frac{|e^{jN\Psi} - 1|}{|e^{j\Psi} - 1|} = \frac{|\sin(N\frac{\Psi}{2})|}{|\sin(\frac{\Psi}{2})|} \quad (1.1)$$

Por medio de un análisis matemático, el SLL obtenido con este arreglo, cuando el número de elementos del arreglo tiende al infinito, es  $SLL_{N \rightarrow \infty} = 13,2 \text{ dB}$  [3].

- Distribuciones no uniformes

#### *Distribución triangular*

Esta distribución de corrientes está direccionada a arreglos con un número impar de elementos ( $N$ ), persiguiendo la lógica de la función de pesos dada en la ecuación (1.2), en donde  $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ .

$$a_n = \begin{cases} n + 1 & n < \frac{N}{2} \\ N - n & n > \frac{N}{2} \end{cases} \quad (1.2)$$

El factor de arreglo que define a esta distribución de alimentación se precisa en la ecuación (1.3).

$$|FA(\Psi)|_{\text{triangular}} = \frac{|\sin(N\frac{\Psi}{2})|^2}{|\sin(\frac{\Psi}{2})|^2} \quad (1.3)$$

Mediante un análisis matemático, el SLL obtenido con este tipo de arreglo, cuando el número de elementos de arreglo tiende al infinito, es  $SLL_{N \rightarrow \infty} = 26,4 \text{ dB}$  [3].

Se aprecia claramente que este SLL resulta el doble que el de la distribución uniforme, cuando el número de elementos es bastante grande. La única restricción de este tipo de alimentación es que se debe usar un número impar de elementos [3].

### Distribución binomial

Esta distribución de corrientes sigue la lógica del binomio de Newton, donde la distribución puede verse gráficamente en el triángulo de pesos detallado en la Figura 1.3.

					1						
				1		1					
			1		2		1				
		1		3		3		1			
	1		4		6		4		1		
	1	5		10		10	5		1		
1		6	15		20		15	6		1	
1	7		21	35		35	21		7	1	
1	8	28		56	70		56	28		8	1
1	9	36	84		126	126	84	36		9	1

Figura 1.3 Triángulo de Pascal [4].

El factor de arreglo que define a esta distribución de alimentación se precisa en la ecuación (1.4).

$$|FA(\Psi)|_{\text{binomial}} = \left| 2 \cos\left(\frac{\Psi}{2}\right) \right|^{N-1} \quad (1.4)$$

Los resultados obtenidos del SLL son mejorados si se considera una comparación con el arreglo uniforme, pero no supera la mejoría obtenida con la distribución triangular cuando el número de elementos es considerablemente grande [3].

#### 1.4.2 IMPLEMENTACIONES DE ARREGLOS DE RADIADORES CON ESQUEMAS DE ALIMENTACIÓN NO UNIFORME

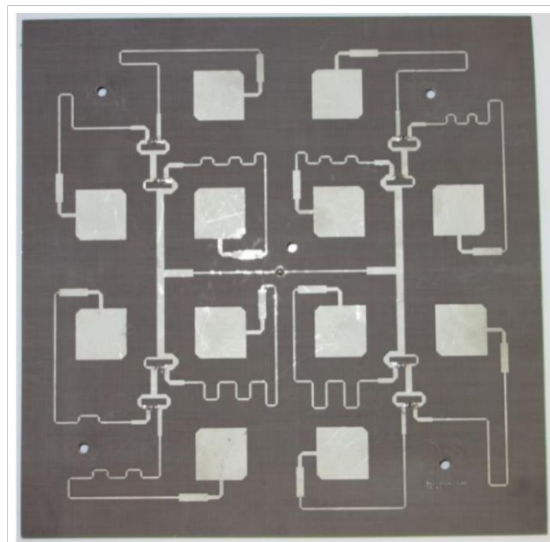
En esta sección se presenta un resumen de tres artículos académicos que muestran diferentes diseños/implementaciones de arreglos de radiadores usando esquemas de amplitud de alimentación no uniformes para el control del SLL. Este estudio se realiza con el objetivo de obtener una guía práctica acerca de los resultados que se esperan conseguir en el presente proyecto.

**Arreglo de antenas de banda ancha no uniforme circularmente polarizadas para comunicaciones vehiculares [2]**

La Figura 1.4 presenta la implementación relacionada al artículo en cuestión. Este artículo presenta el diseño, simulación e implementación de un arreglo rectangular de antenas de banda ancha en disposición  $4 \times 4$ , con los radiadores de las esquinas omitidos. Este arreglo se presenta como una solución para aplicaciones de comunicaciones vehiculares, tomando en cuenta los estándares EN12253 y EN302571 (establecidos por el Comité para la Estandarización Europeo y el Instituto de Estándares de Telecomunicaciones Europeo), que establecen las frecuencias de funcionamiento de esta tecnología en 5,8 GHz y 5,9 GHz, además de requerir un nivel de SLL de no menos de 15 dB [2].

Para lograr el objetivo, se realiza el diseño del arreglo de antenas tipo *patch* implementadas en circuito impreso, en conjunto con una red de alimentación que permite un esquema de distribución de corriente no uniforme tipo binomial para la excitación de los radiadores.

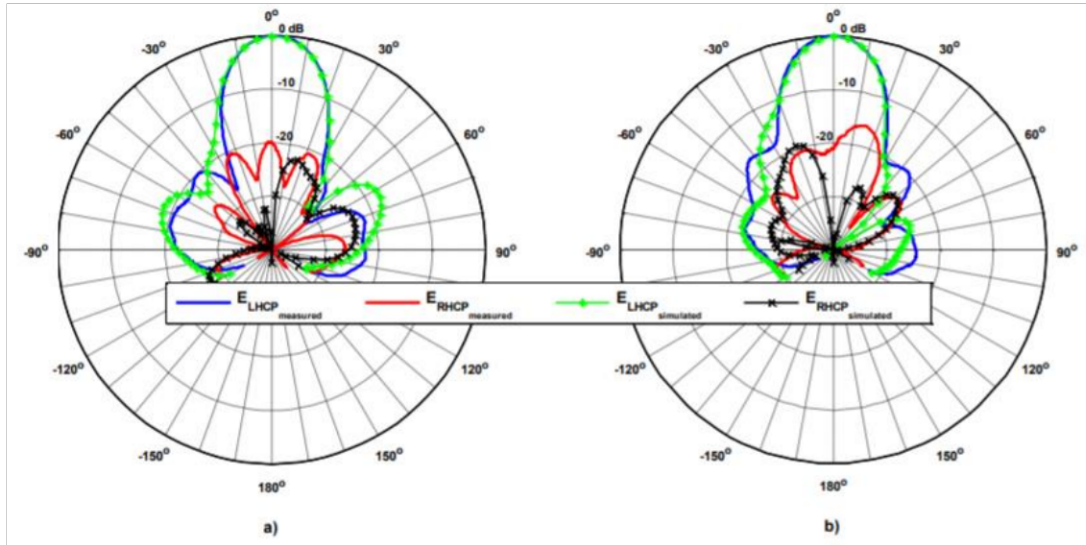
Para la determinación del esquema de distribución de corriente a usar en el proyecto se realizó un análisis comparativo entre las distribuciones uniforme, binomial, Taylor y Dolph-Tschebyscheff; obteniendo un mejor resultado al usar la distribución binomial. Se analizó también la viabilidad de usar este esquema con la disposición geométrica planteada ( $4 \times 4$  omitido en las esquinas), donde se observó una ligera disminución en el SLL, pero aún seguía cumpliendo con el requerimiento del estándar.



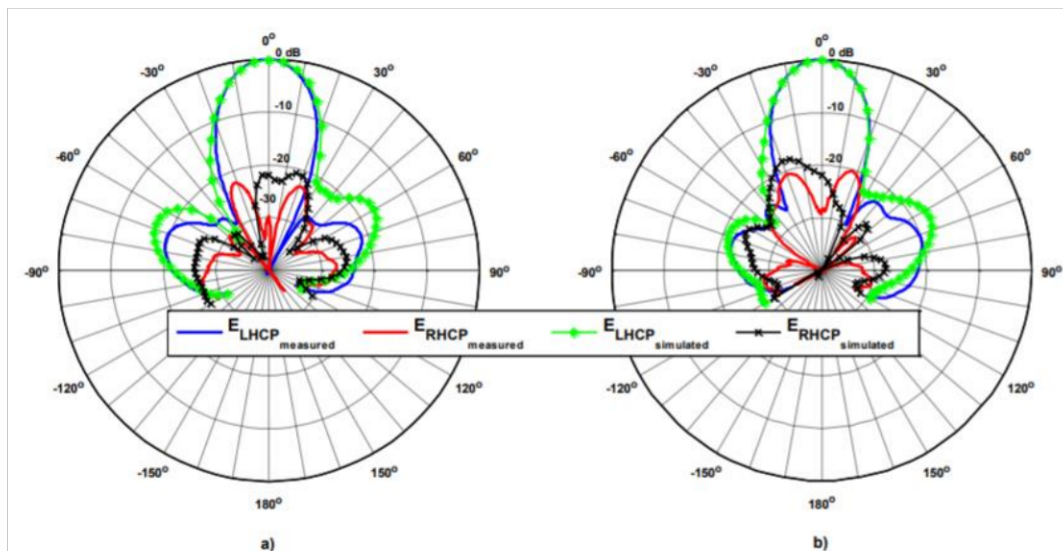
**Figura 1.4** Arreglo de antenas no uniforme implementada para comunicaciones vehiculares [2].

Los resultados que se obtuvieron para las frecuencias de interés (estándar) son las presentadas en la Figura 1.5 Patrones de radiación normalizados medidos y simulados a 5,8 GHz: a) plano  $\phi = 0^\circ$  b) plano  $\phi = 90^\circ$  [2].y Figura 1.6.





**Figura 1.5** Patrones de radiación normalizados medidos y simulados a 5,8 GHz: a) plano  $\phi = 0^\circ$  b) plano  $\phi = 90^\circ$  [2].

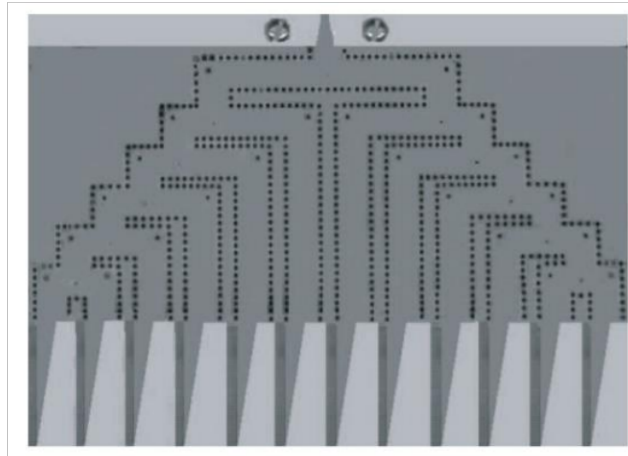


**Figura 1.6** Patrones de radiación normalizados medidos y simulados a 5,9 GHz: a) plano  $\phi=0^\circ$  b) plano  $\phi=90^\circ$  [2].

***Arreglo lineal de antenas tipo guía de onda integradas en un sustrato de ranura cónica corrugado alimentadas mediante un divisor de potencia cuasi triangular [5]***

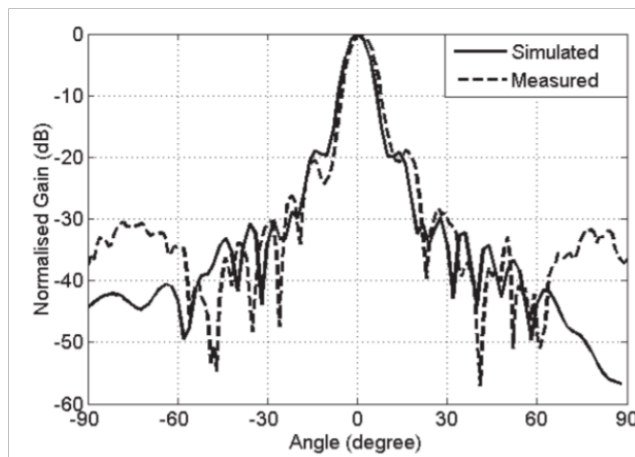
Este artículo presenta el diseño, simulación e implementación de un arreglo de antenas con tecnología guía de onda integrada en un sustrato (SIW por sus siglas en inglés) para radiación *end-fire*, utilizando un esquema cuasi triangular de alimentación para el control del SLL [5]. La Figura 1.7 muestra el producto obtenido en el proyecto en mención.

Para lograr este objetivo se utilizan antenas de ranura cónica (TSA por sus siglas en inglés) debido a que éstas presentan menores efectos causados por las radiaciones espurias, que se pueden generar por elementos varios en el sustrato, cuando se tiene un esquema de radiación *end-fire* [5].



**Figura 1.7** Arreglo de antenas TSA de 12 elementos alimentados por un divisor de potencia cuasi triangular [5].

Los resultados obtenidos en las simulaciones y mediciones se presentan en la Figura 1.8.

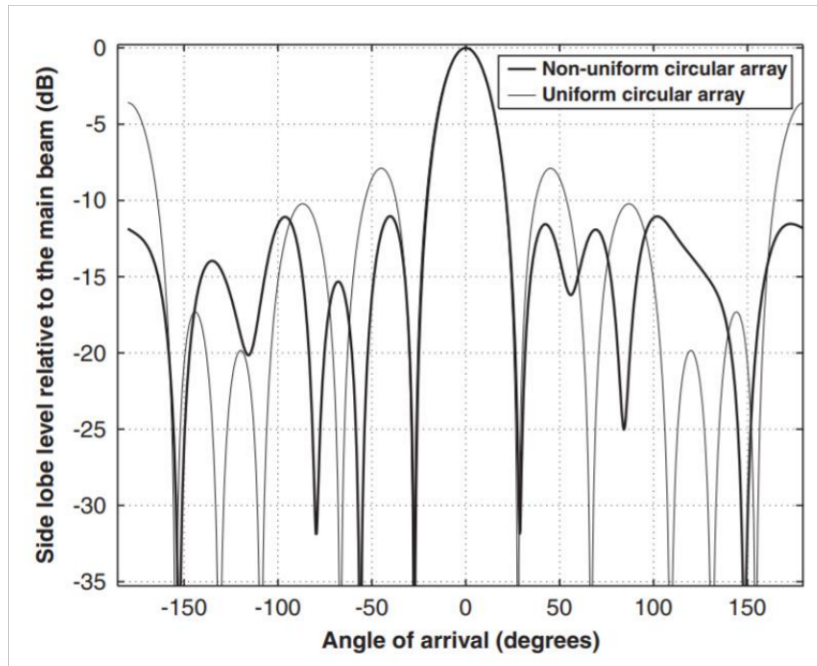


**Figura 1.8** Patrón de radiación medido y simulado del arreglo de antenas TSA de 12 elementos [5].

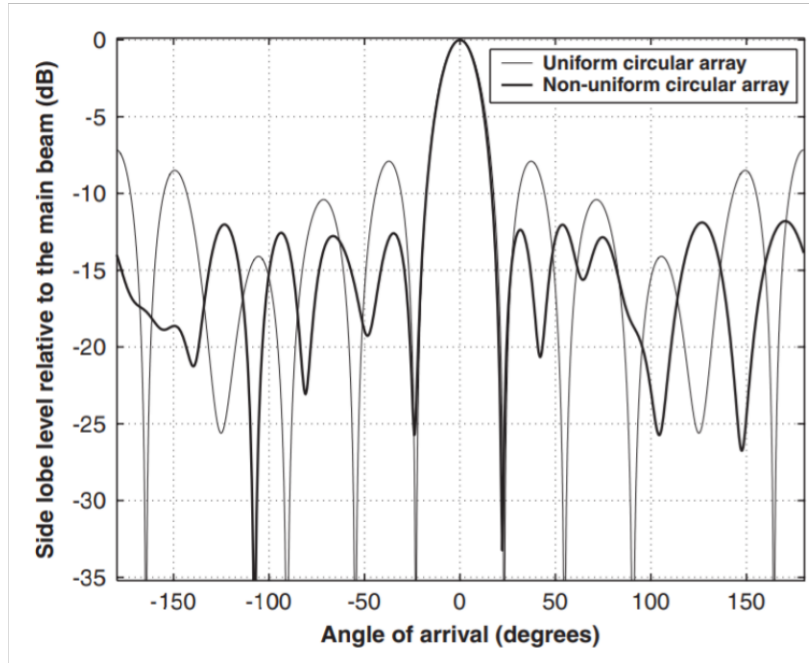
### ***Diseño de un arreglo de antenas circular no uniforme para la reducción del nivel del lóbulo lateral usando el método de algoritmo genético [6]***

Este trabajo plantea el uso de un algoritmo genético para el diseño de un arreglo circular de antenas no uniforme [6]. Un algoritmo genético es un algoritmo de búsqueda basado en los mecanismos de selección natural y genética natural. Este algoritmo genera nuevas

cadena de datos (llamados criaturas) en base a la cadena de datos previa “más apta” [7]. El propósito de este algoritmo es encontrar la distribución de alimentación y las separaciones entre elementos adecuadas para la minimización del SLL. Para evaluar la efectividad del método, se utiliza una cantidad de radiadores de 10 y 12, obteniendo los resultados presentes en la Figura 1.9 y Figura 1.10.



**Figura 1.9** Comparación entre los diagramas de radiación de un arreglo circular de antenas uniforme y un arreglo no uniforme optimizado mediante el método de algoritmo genético con  $N = 10$  [6].



**Figura 1.10** Comparación entre los diagramas de radiación de un arreglo circular de antenas uniforme y un arreglo no uniforme optimizado mediante el método de algoritmo genético con  $N = 12$  [6].

## 2 METODOLOGÍA

En este capítulo se describe a detalle el proceso completo que se sigue para la obtención del producto final demostrable del presente proyecto. El desarrollo del prototipo consta de una etapa inicial de simulación en el software MATLAB, en el cual se simula el campo eléctrico lejano de radiación para los casos de radiadores isotrópicos, dipolo de media longitud de onda y antena *patch*. Se obtiene la información de los diagramas de radiación variando la cantidad de elementos del arreglo ( $N$ ) y la distancia entre elementos ( $D$ ). Estos datos, junto a el SLL para cada caso, permiten obtener gráficos de superficie tridimensional que muestran el valor del SLL en función de  $N$  y  $D$ , para cada tipo de antena. Asimismo, permiten realizar un análisis objetivo para la determinación del radiador a utilizar en el proyecto, el número de elementos y la distancia entre estos, con el fin de obtener el mejor resultado posible.

Seguidamente, se utiliza el software de simulación Keysight® ADS tanto para el modelamiento y simulación de un radiador como para la determinación del *layout* del arreglo a ser implementado en el sustrato. El resultado permite la implementación del arreglo lineal de antenas como último punto, obteniendo los resultados que se presentan al final de este capítulo.

### 2.1 SIMULACIÓN DE CAMPO ELÉCTRICOS LEJANOS EN MATLAB

Para esta etapa es necesario el desarrollo de las ecuaciones que describen el comportamiento de los radiadores, y los arreglos uniformes y no uniformes en términos de campo electromagnético. Las expresiones de campo eléctrico lejano del dipolo de media longitud de onda ( $E_{\theta\_D}$ ) y de la antena *patch* ( $E_{\phi\_P}$ ) se presentan en las ecuaciones (2.1) y (2.2), respectivamente [1], [3].

$$E_{\theta\_D} = jZ_0 \frac{I_0 e^{-jkr} \cos\left(\frac{\pi}{2} \cos(\theta)\right)}{2\pi r \sin(\theta)} \quad (2.1)$$

$$E_{\phi\_P} = j \frac{hI_0 e^{-jkr} \cos(\theta)}{\pi r \sin(\theta)} \sin\left(\frac{k_0}{2} \cos \theta\right) \cos\left(\frac{k_0 L_{\text{eff}}}{2} \cos \theta \sin \phi\right) \quad (2.2)$$

En donde  $k_0$  es la constante de propagación en el vacío,  $Z_0$  la impedancia característica del vacío,  $I_0$  la magnitud de la corriente de alimentación de la antena,  $r$  la distancia del

radiador al punto de análisis (campo lejano),  $h$  el espesor del sustrato a utilizar en la antena *patch* y  $L_{\text{eff}}$  la longitud efectiva de la antena *patch*.

Los arreglos de radiadores se probarán con distintos tipos de alimentación: uniforme, binomial y triangular. Los factores de arreglo que definen estos tipos de alimentación se describieron en la sección 1.4.1.

El campo electromagnético resultante de un arreglo de antenas se obtiene por la multiplicación del campo eléctrico de un radiador individual y el factor de arreglo. Por lo tanto, los campos eléctricos resultantes de los arreglos de antenas con diferente alimentación responden a las relaciones presentes en las ecuaciones de la (2.3) a la (2.8).

$$E_{\theta\_D\_FAU} = E_{\theta\_D} \cdot FA_U$$

$$E_{\theta\_D\_FAU} = jZ_0 \frac{I_0 e^{-jkr} \cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right) \sin\left(\frac{N}{2} \psi\right)}{2N\pi r \sin \theta \sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \quad (2.3)$$

$$E_{\theta\_D\_FAB} = E_{\theta\_D} \cdot FA_B$$

$$E_{\theta\_D\_FAU} = jZ_0 \frac{I_0 e^{-jkr} \cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{2\pi r \sin \theta} \left| 2 \cos\left(\frac{\psi}{2}\right) \right|^{N-1} \quad (2.4)$$

$$E_{\theta\_D\_FAT} = E_{\theta\_D} \cdot FA_T$$

$$E_{\theta\_D\_FAU} = jZ_0 \frac{I_0 e^{-jkr} \cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{2\pi r \sin \theta} \left| \frac{\sin\left(\frac{N+1}{4} \psi\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \right|^2 \quad (2.5)$$

$$E_{\phi\_P\_FAU} = E_{\theta\_P} \cdot FA_U$$

$$E_{\phi\_D\_FAU} = j \frac{hI_0 e^{-jkr} \cos \theta}{\pi r \sin \theta} \sin\left(\frac{k_0}{2} \cos \theta\right) \cos\left(\frac{k_0 L_{\text{eff}}}{2} \cos \theta \sin \phi\right) \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \psi\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \quad (2.6)$$

$$E_{\phi\_P\_FAB} = E_{\theta\_P} \cdot FA_B$$

$$E_{\phi\_D\_FAU} = j \frac{hI_0 e^{-jkr} \cos \theta}{\pi r \sin \theta} \sin\left(\frac{k_0}{2} \cos \theta\right) \cos\left(\frac{k_0 L_{\text{eff}}}{2} \cos \theta \sin \phi\right) \left| 2 \cos\left(\frac{\psi}{2}\right) \right|^{N-1} \quad (2.7)$$

$$E_{\phi\_P\_FAT} = E_{\theta\_P} \cdot FA_T$$

$$E_{\phi\_D\_FAU} = j \frac{hI_0 e^{-jkr} \cos \theta}{\pi r \sin \theta} \sin\left(\frac{k_0}{2} \cos \theta\right) \cos\left(\frac{k_0 L_{\text{eff}}}{2} \cos \theta \sin \phi\right) \left| \frac{\sin\left(\frac{N+1}{4} \psi\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \right|^2 \quad (2.8)$$

Se puede observar que para la obtención del campo eléctrico de la antena tipo *patch* es necesario determinar los valores de sus dimensiones físicas. Por lo tanto, se realiza el diseño de este radiador tomando en cuenta la frecuencia de trabajo.

Para el diseño del radiador tipo *patch* en el sustrato, se debe tener en cuenta las características del sustrato a utilizar. En este trabajo se utilizará el sustrato FR4 el cual posee las siguientes características:

- Espesor del sustrato ( $h$ ): 1,5 mm
- Permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ): 4,3

También se debe tomar en cuenta la frecuencia a la cual se desea trabajar que en este caso es de  $f_0 = 5$  GHz. La relación que permite encontrar el ancho de la antena se describe en la ecuación (2.9) [8].

$$W = \frac{v}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.9)$$

Donde:

$v$ : Velocidad de propagación (se asume la velocidad de la luz en el vacío).

$f_r$ : Frecuencia de operación ( $f_0$ ).

Por lo tanto,  $W = 18,43$  mm. Para determinar la permitividad efectiva del sustrato ( $\epsilon_{\text{eff}}$ ) se utiliza la ecuación (2.10) [8].

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{-0,5} \quad (2.10)$$

Entonces, la permitividad efectiva tiene un valor de  $\epsilon_{\text{eff}} = 3,83$ . La longitud efectiva de la antena ( $L_{\text{eff}}$ ) está conformada por su longitud física ( $L$ ) y el doble de una variación de longitud ( $\Delta L$ ) la cual responde al efecto *fringing* en la antena [1]. Ésta se encuentra en función  $\epsilon_{\text{eff}}$ ,  $W$  y  $h$ , como se describe en la ecuación (2.11) [8].

$$\frac{\Delta L}{h} = \frac{0,412(\epsilon_{\text{eff}} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8\right)} \quad (2.11)$$

Por lo tanto, la variación de la longitud es de  $\Delta L = 0,69$  mm.

La longitud efectiva de la antena tiene el valor de la mitad de la longitud de onda efectiva ( $\lambda_{\text{eff}}$ ) lo que se observa en la ecuación (2.12) [8].

$$L_{\text{eff}} = \frac{\lambda_{\text{eff}}}{2} = \frac{v}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (2.12)$$

Por lo tanto,  $L_{\text{eff}} = 15,34$  mm.

Entonces, la longitud física del radiador viene dada por la ecuación (2.13).

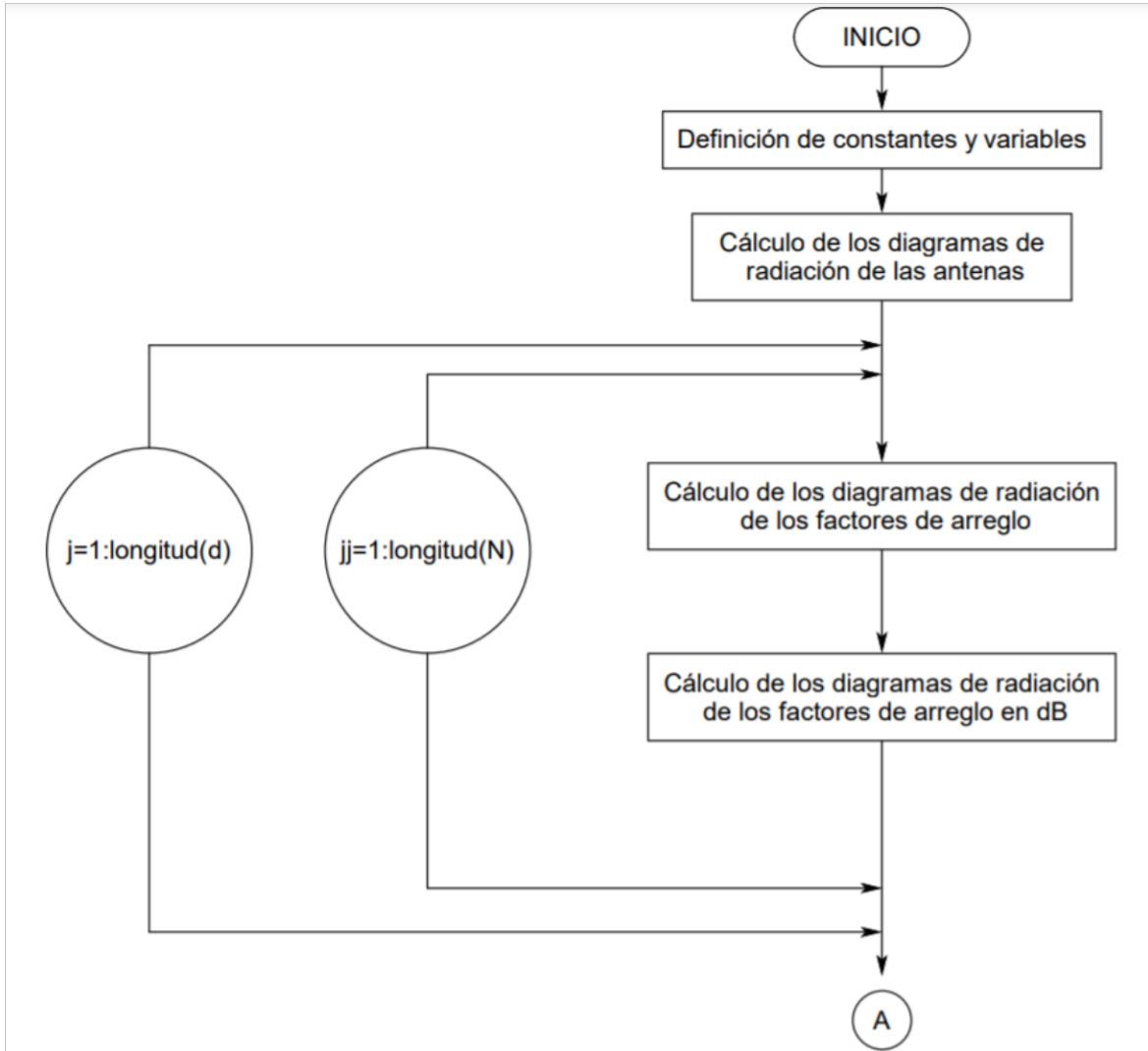
$$L = L_{\text{eff}} - 2 \Delta L \quad (2.13)$$

Obteniendo como valor  $L = 13,97$  mm.

Con las ecuaciones y dimensiones disponibles, se procede a escribir el código en el software MATLAB que represente estas relaciones y que permita obtener los valores de campo eléctrico lejano para su representación gráfica. A continuación, se presentan (en diagramas de flujo) los procesos seguidos para la simulación de los diagramas de radiación de interés en este trabajo.



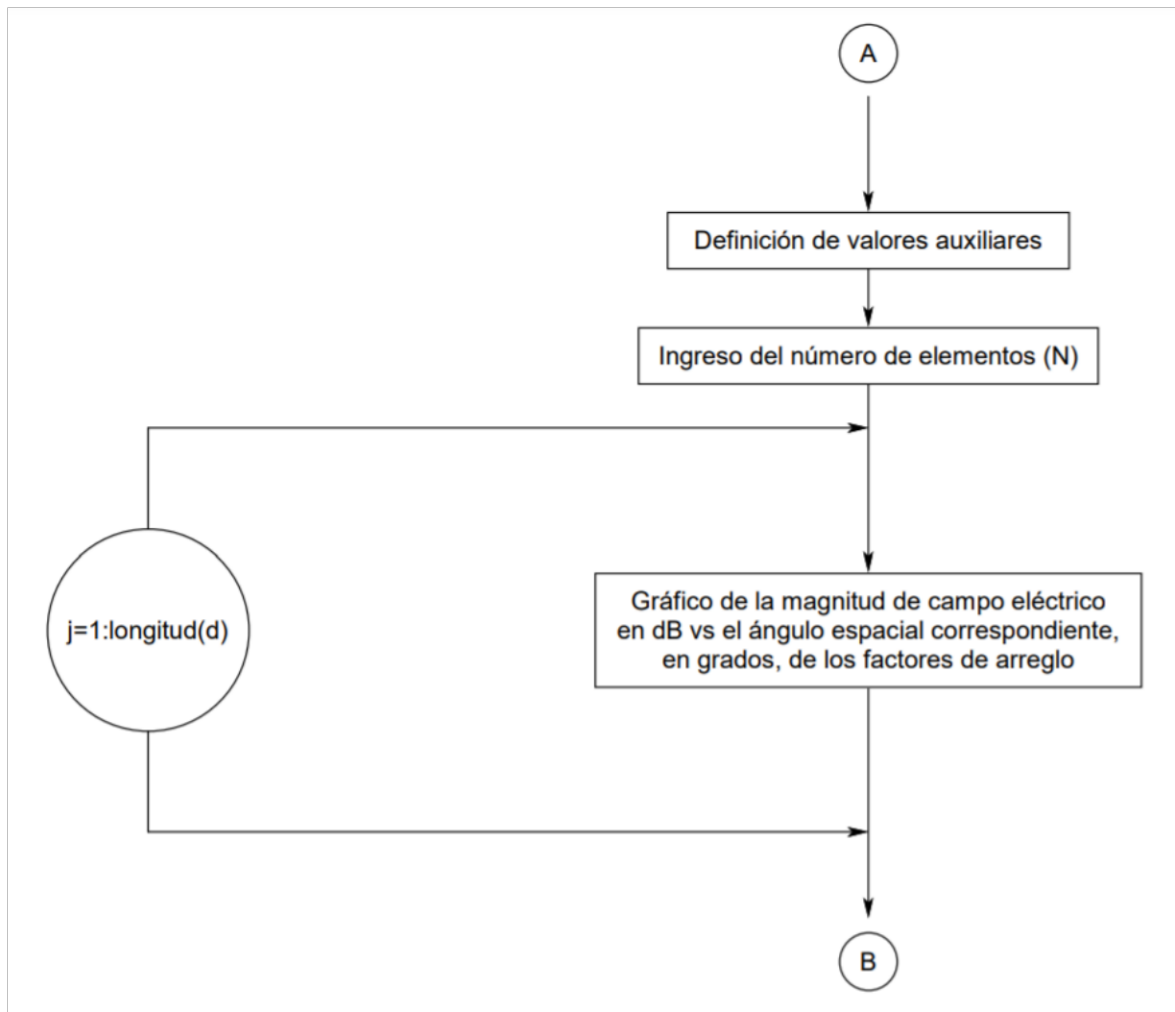
La Figura 2.1 muestra el diagrama de flujo para el proceso inicial en el cual se definen las constantes y los valores de los elementos variables que se va a utilizar dentro de las ecuaciones. Se obtienen los valores de campo eléctrico de los elementos radiantes a utilizar y se calcula los diagramas de radiación resultantes que toman en cuenta como referencia una antena isotrópica (diagrama de radiación de los factores de arreglo).



**Figura 2.1** Diagrama de flujo de definición de constantes variables y cálculo de los diagramas de radiación de los factores de arreglos en V/m y en dB.

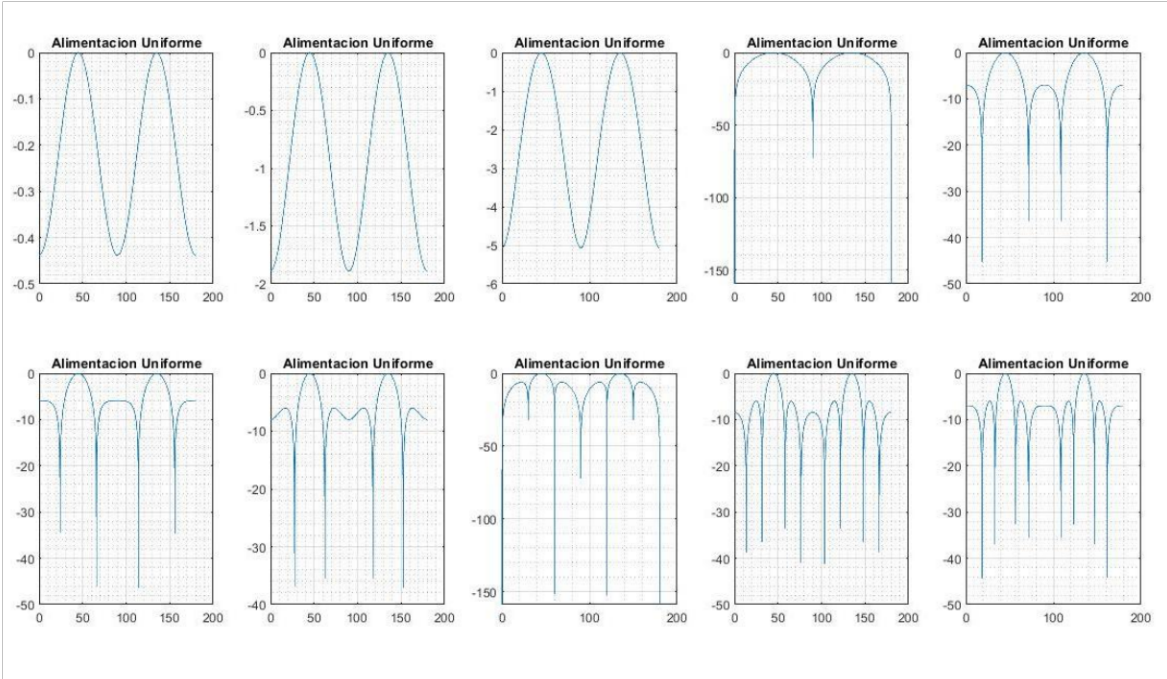
La Figura 2.2 presenta el diagrama de flujo para la obtención de los gráficos de magnitud de campo eléctrico vs ángulo para factores de arreglo. Con el fin de observar el SLL que poseen los diagramas de radiación de los factores de arreglo se generan gráficos de éstos en donde el eje de las ordenadas represente la magnitud de campo eléctrico expresado en decibelios, y el eje de las abscisas el ángulo espacial al que corresponde la magnitud de campo eléctrico. Debido a la gran cantidad de datos, el programa requiere una entrada de

información de usuario, siendo éste el número de elementos usados en el arreglo, limitando el número de resultados visibles.

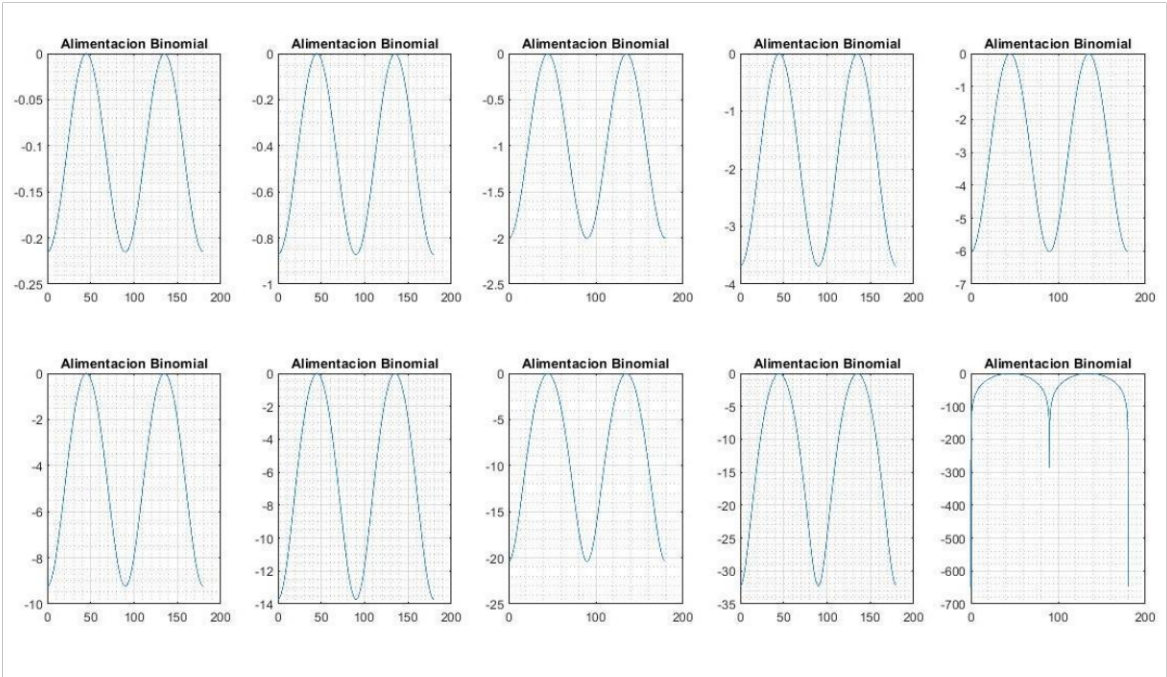


**Figura 2.2** Diagrama de flujo para la obtención de los gráficos de magnitud de campo eléctrico vs ángulo para factores de arreglo.

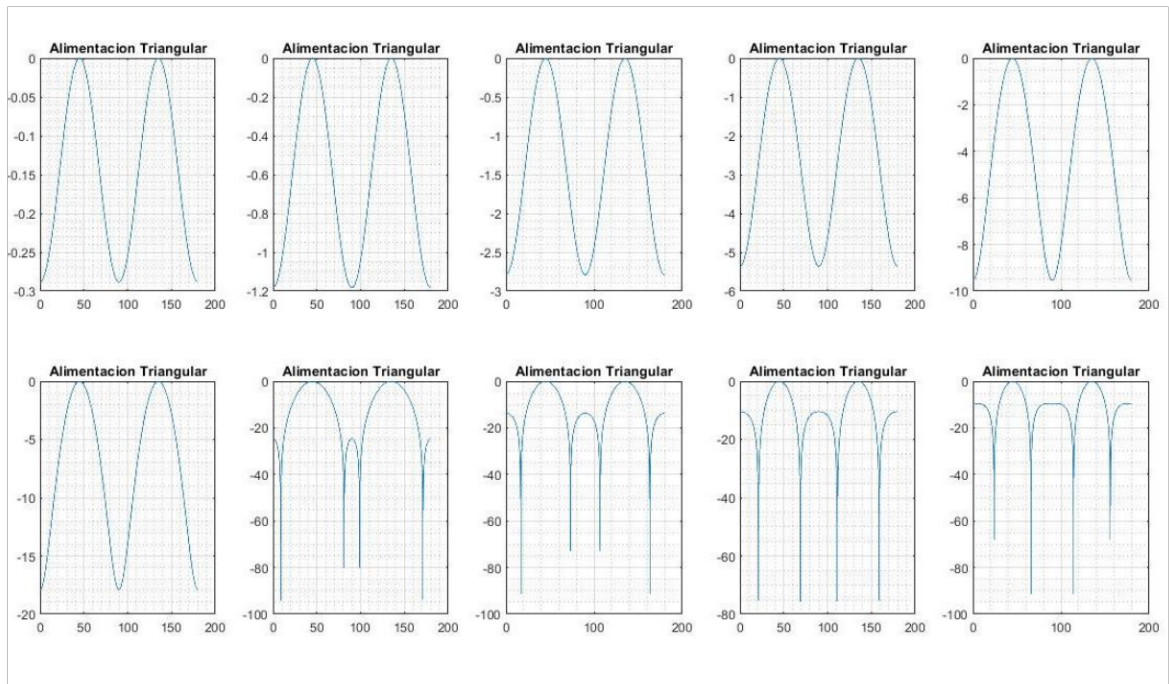
Las gráficas presentadas en la Figura 2.3 a la Figura 2.5 se obtienen para un número de elementos de 5.



**Figura 2.3** Magnitud de campo eléctrico vs ángulo para un factor de arreglo con distribución de alimentación uniforme.

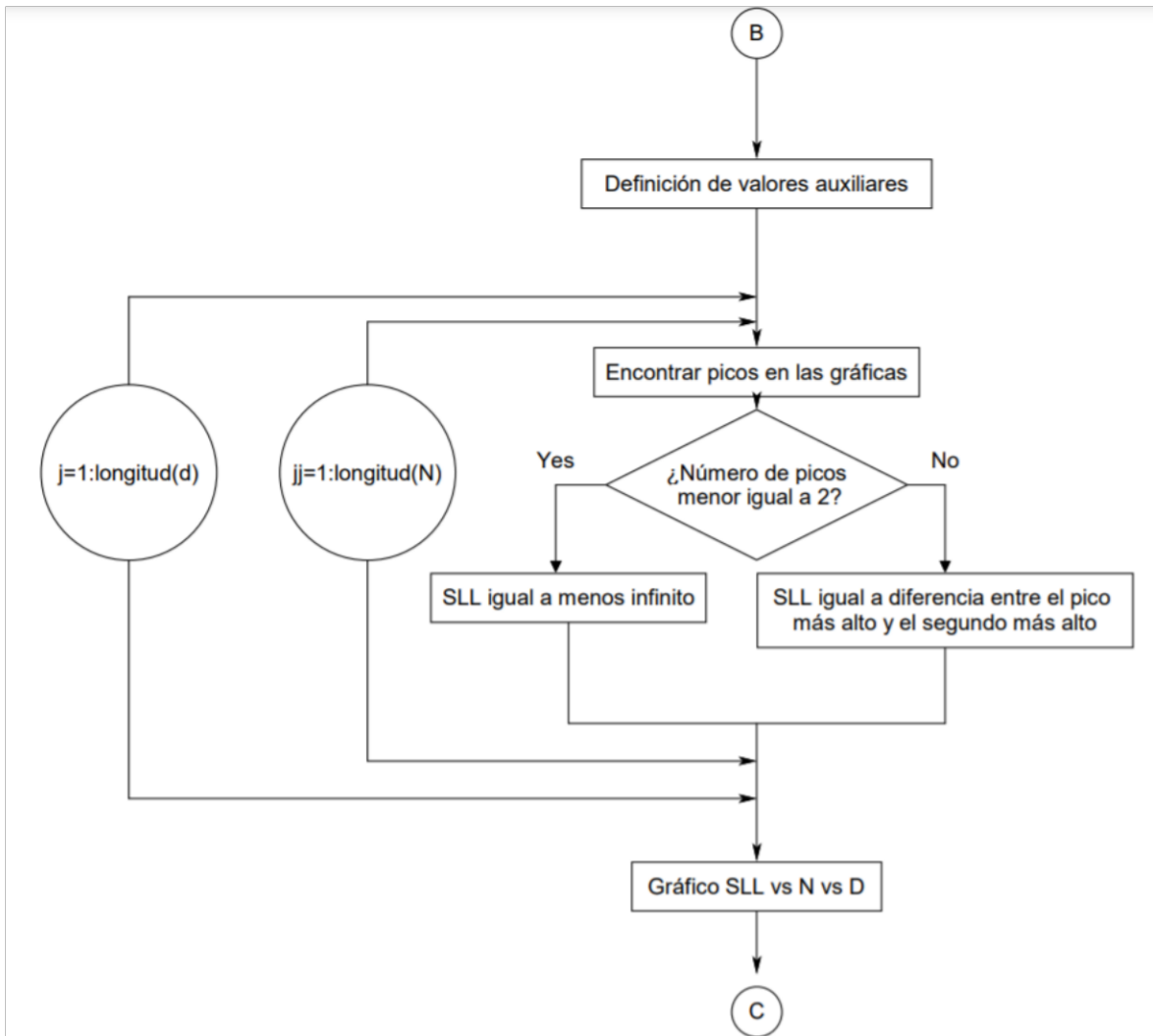


**Figura 2.4** Magnitud de campo eléctrico vs ángulo para un factor de arreglo con distribución de alimentación binomial.

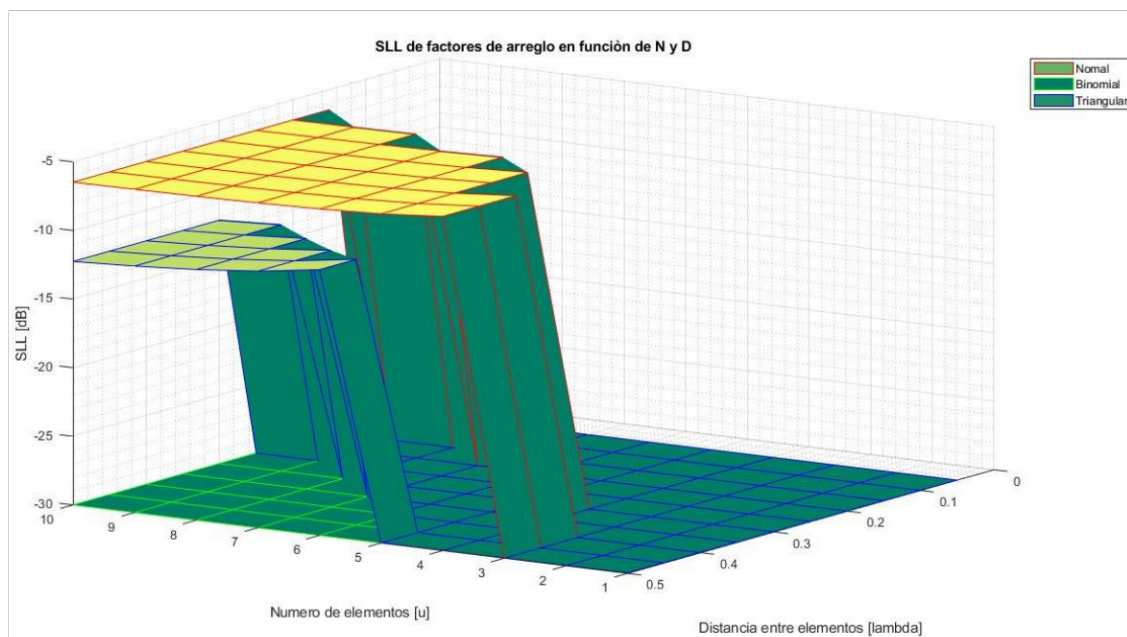


**Figura 2.5** Magnitud de campo eléctrico vs ángulo para un factor de arreglo con distribución de alimentación triangular.

Para evaluar cada una de las posibles combinaciones entre las variables de estudio ( $N$  y  $D$ ) con el SLL, se opta por crear un algoritmo que devuelva el valor de SLL de cada uno de los diagramas de radiación generados en los pasos anteriores. Este algoritmo se visualiza en el diagrama de flujo de la Figura 2.6. Con estos resultados, y con los valores de  $N$  y  $D$  relacionados a los valores de SLL, se genera un gráfico de superficie tridimensional que facilita el análisis de todas las combinaciones posibles entre las variables. El resultado obtenido se muestra en la Figura 2.7.



**Figura 2.6** Diagrama de flujo de la obtención de los valores de SLL y grafico de superficie SLL vs N vs D.

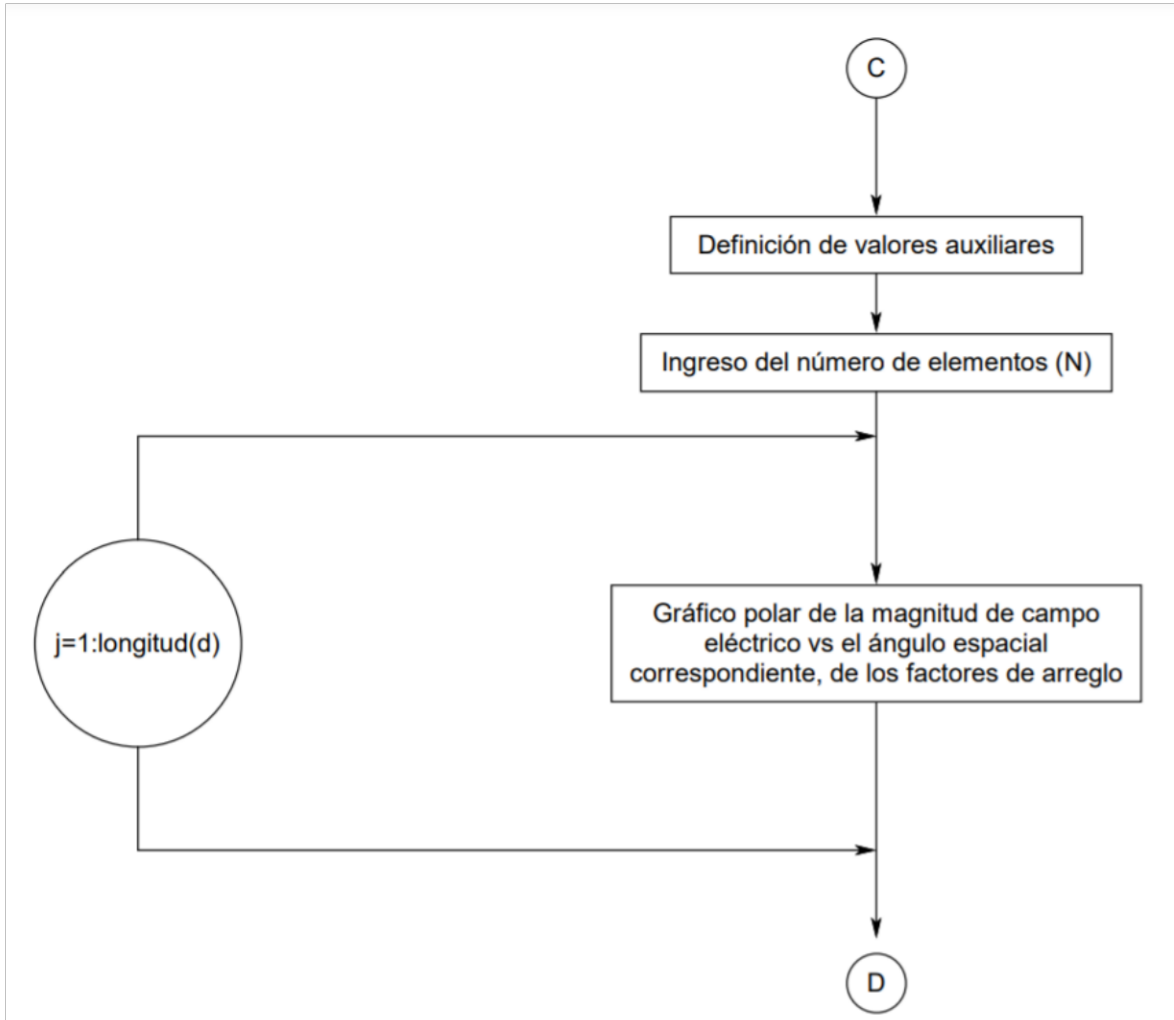


**Figura 2.7** Gráfico SLL vs  $N$  vs  $D$  de factores de arreglo con unidad de radiación omnidireccional.

Como se puede apreciar en la Figura 2.7, mientras mayor sea la separación entre elementos, el SLL aumenta su valor. Pero este aumento de valor es diferente dependiendo del tipo de distribución de alimentación utilizada.

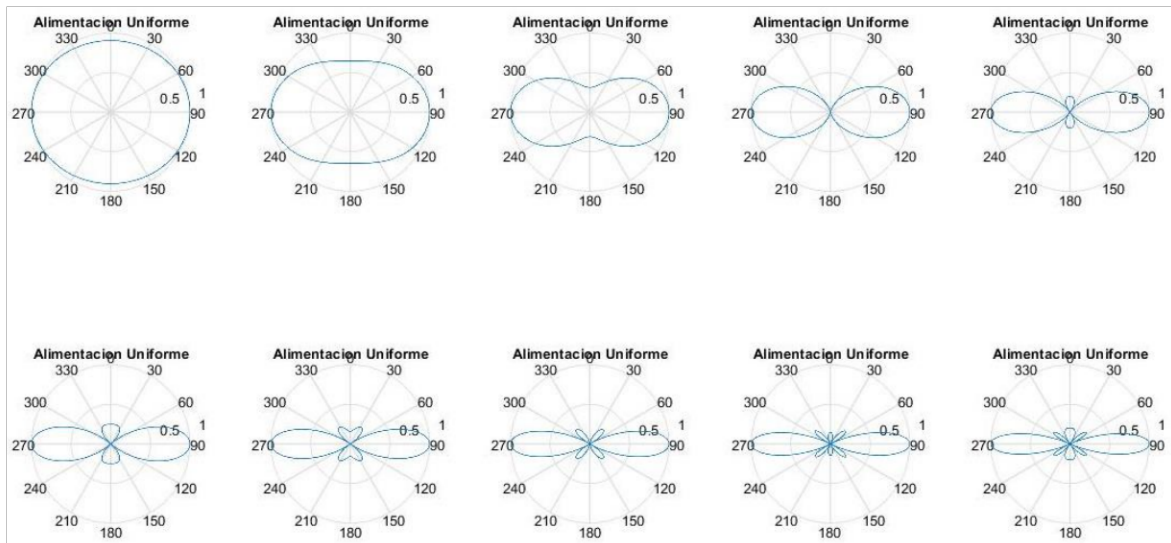
Por ejemplo, el valor de SLL con una distribución uniforme a partir de los  $0,1\lambda$  se mantiene relativamente constante entre  $-10$  dB y  $0$  dB. En el caso de la distribución triangular el SLL también se mantiene en un rango constante, pero alcanzando valores inferiores. La distribución binomial, para los valores de  $N$  y  $D$  tomados en cuenta, no presenta lóbulos secundarios, por lo que su valor de SLL siempre tiende al  $-\infty$ .

Para una visualización más comprensiva del gráfico en la Figura 2.7, se puede obtener los diagramas de radiación de campo E de los arreglos de radiadores (para el caso particular de un radiador isotrópico), utilizando los distintos tipos de distribuciones de alimentación del estudio, para el caso de un  $N$  fijo, y todos los  $D$  en consideración. La Figura 2.8 muestra el diagrama de flujo para la obtención de los diagramas de radiación antes mencionados.

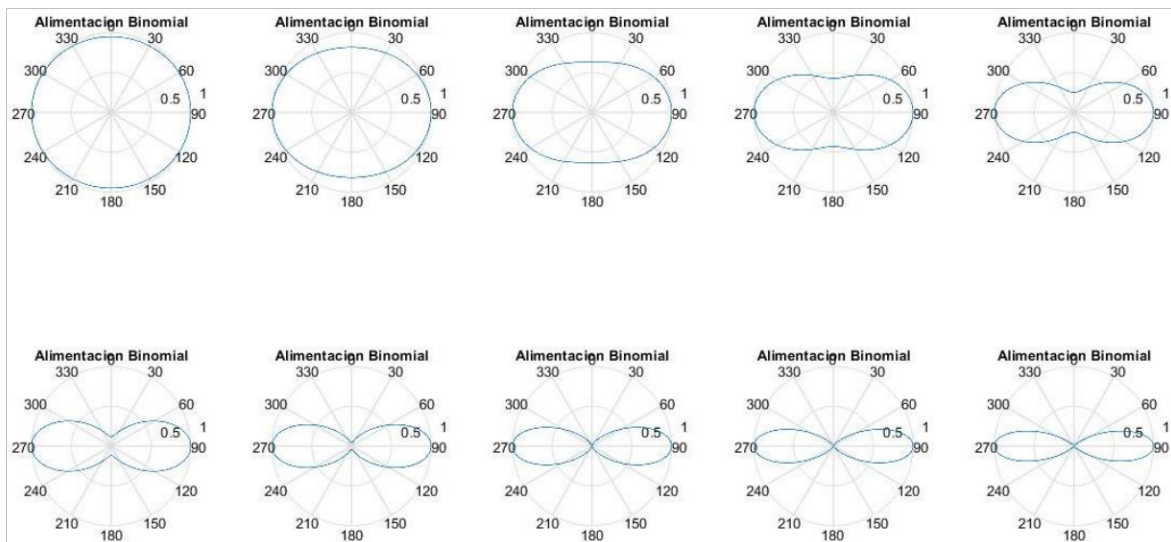


**Figura 2.8** Diagrama de flujo para la obtención de los gráficos polares de magnitud de campo eléctrico vs ángulo para factores de arreglo

Las gráficas presentadas en la Figura 2.9 a la Figura 2.11 se obtienen para un número de elementos de 5.

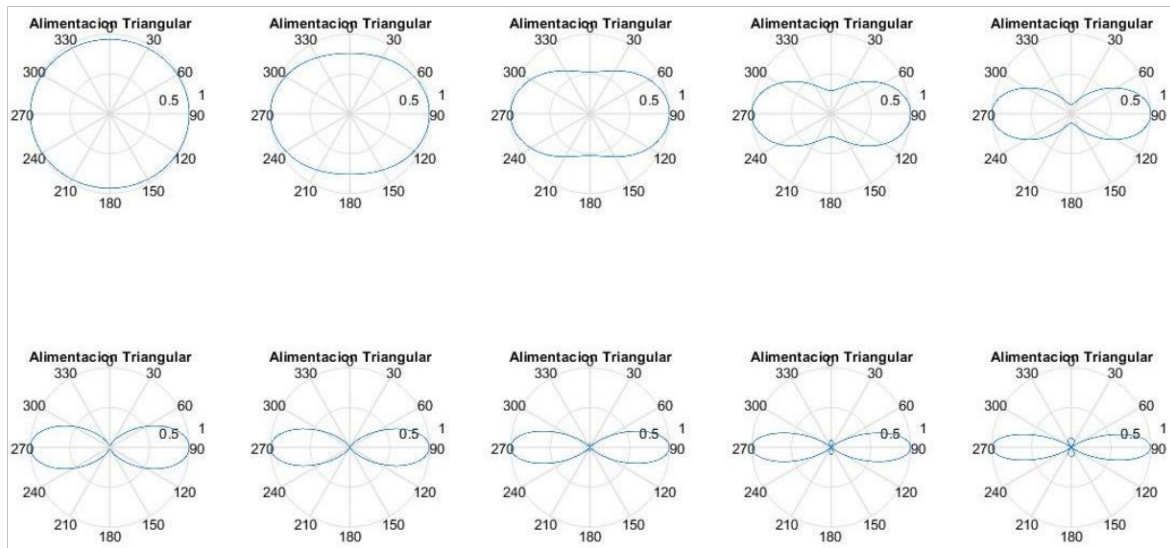


**Figura 2.9** Gráficos polares de magnitud vs ángulo para  $N = 5$  para arreglos de antena con distribución de corriente uniforme.



**Figura 2.10** Gráficos polares de magnitud vs ángulo para  $N = 5$  para arreglos de antena con distribución de corriente binomial.



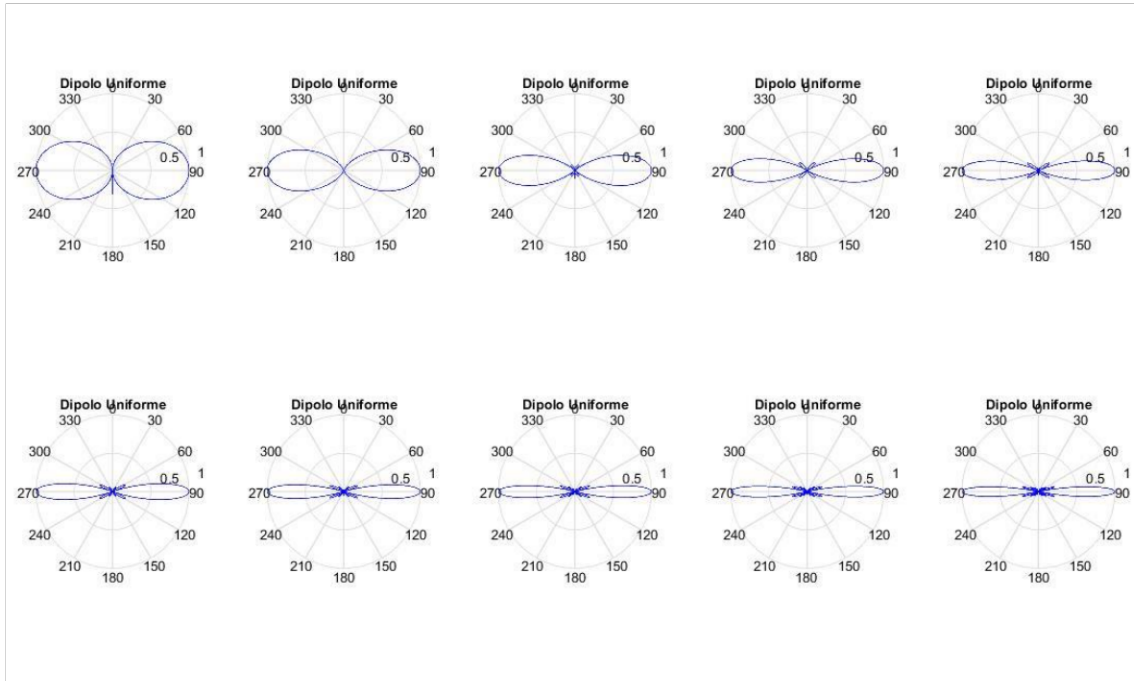


**Figura 2.11** Gráficos polares de magnitud vs ángulo para  $N = 5$  para arreglos de antena con distribución de corriente triangular.

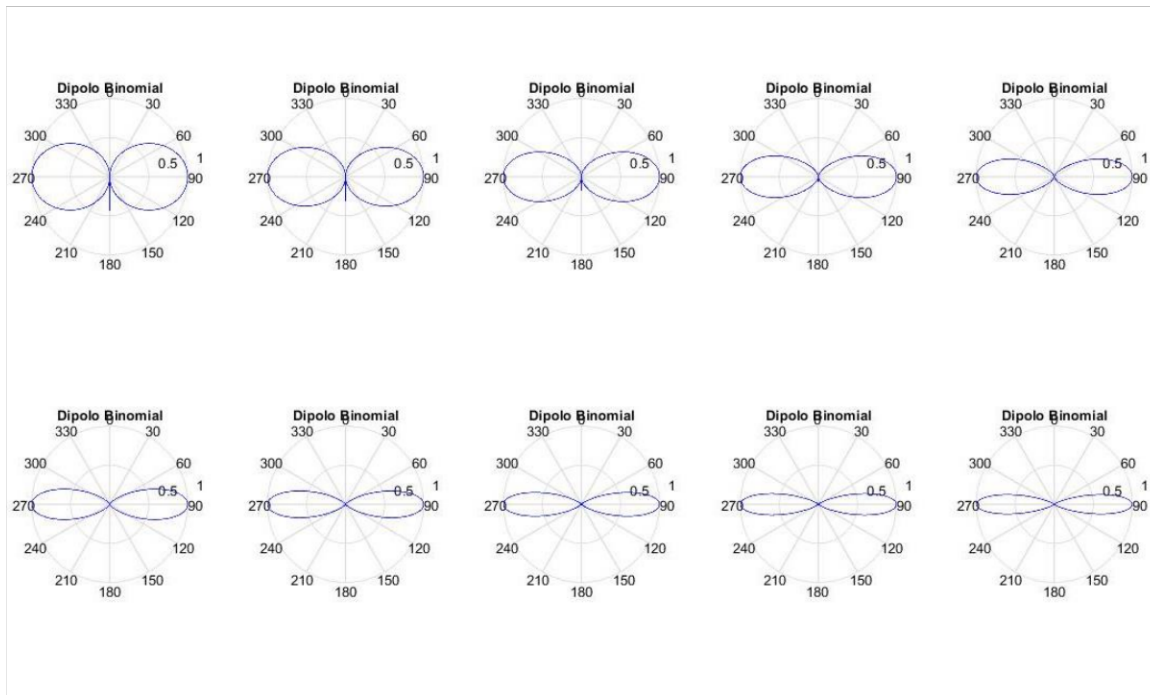
Como se esperaba, debido a las conclusiones del análisis de la Figura 2.7, la distribución uniforme presenta lóbulos secundarios mayores a la de la distribución triangular, mientras que la distribución binomial no presente lóbulos secundarios.

Estas observaciones resultan útiles en el sentido de aproximarse a un escenario ideal (un radiador isotrópico). Pero si se quiere obtener conclusiones más cercanas de la realidad, es necesario repetir todos los procedimientos tomando en cuenta los diagramas de radiación de los radiadores del presente estudio.

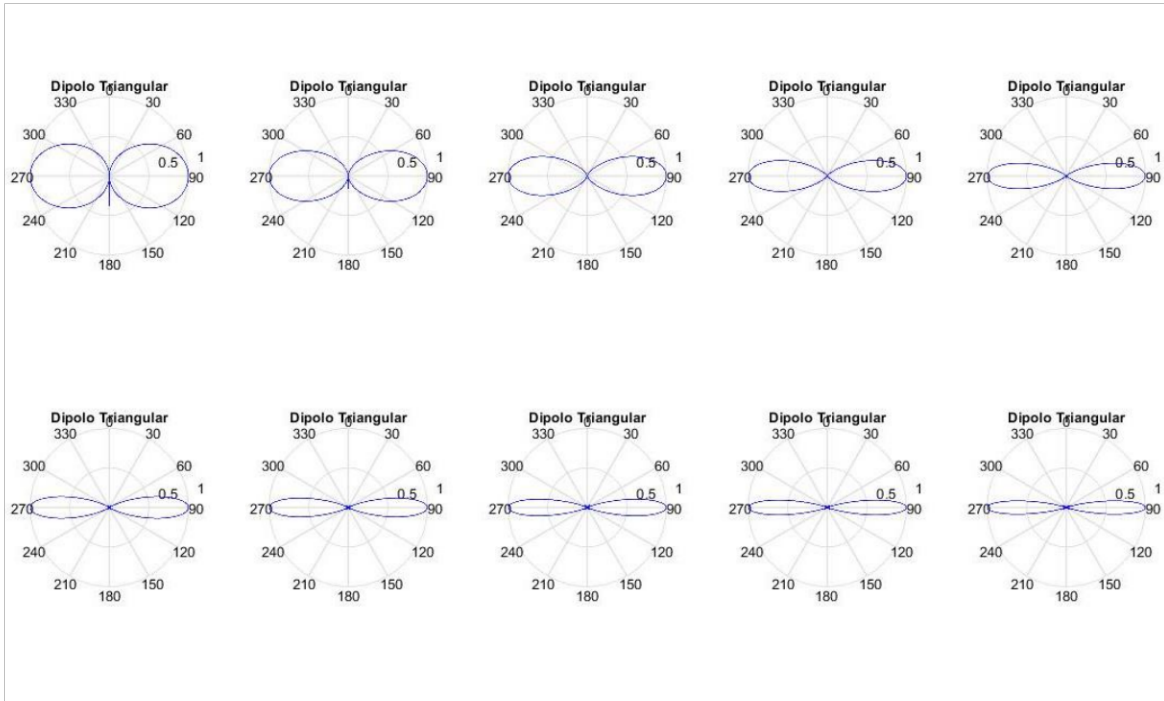
Para la obtención de los diagramas de radiación de los arreglos de antenas, se sigue un proceso similar al descrito en la Figura 2.1, pero se toma en cuenta los campos producidos por los radiadores del estudio. Para graficar estos diagramas de radiación, se practican procesos similares a los de la Figura 2.8, permitiendo la visualización de los resultados de los arreglos de estudio. Obteniendo, para un  $N = 5$ , los resultados presentes en las figuras de la Figura 2.9 a la Figura 2.17.



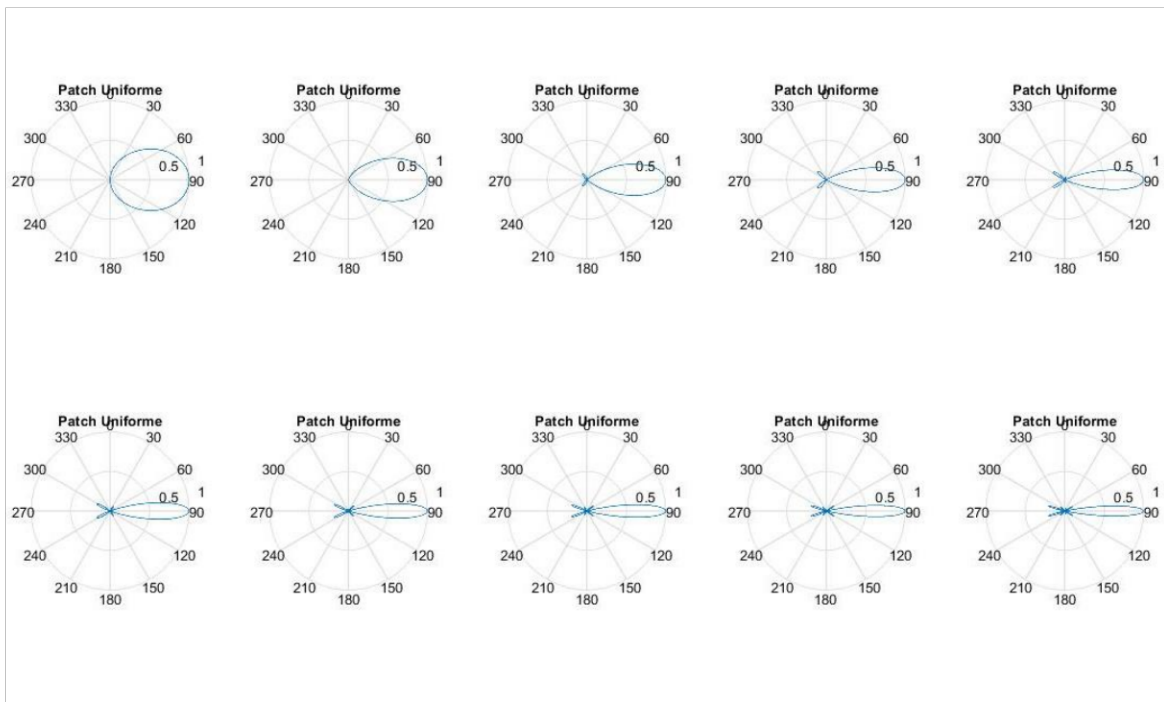
**Figura 2.12** Gráficos polares de magnitud vs ángulo para  $N = 5$  para arreglos de antenas dipolo con distribución de corriente uniforme.



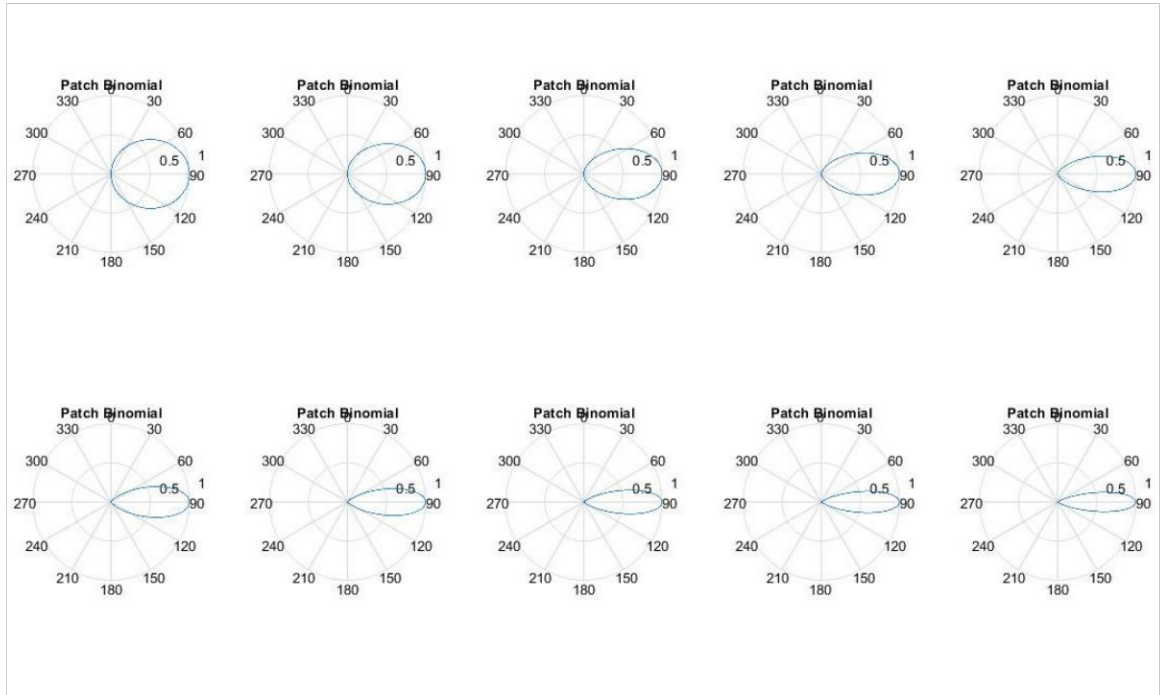
**Figura 2.13** Gráficos polares de magnitud vs ángulo para  $N = 5$  para arreglos de antenas dipolo con distribución de corriente binomial.



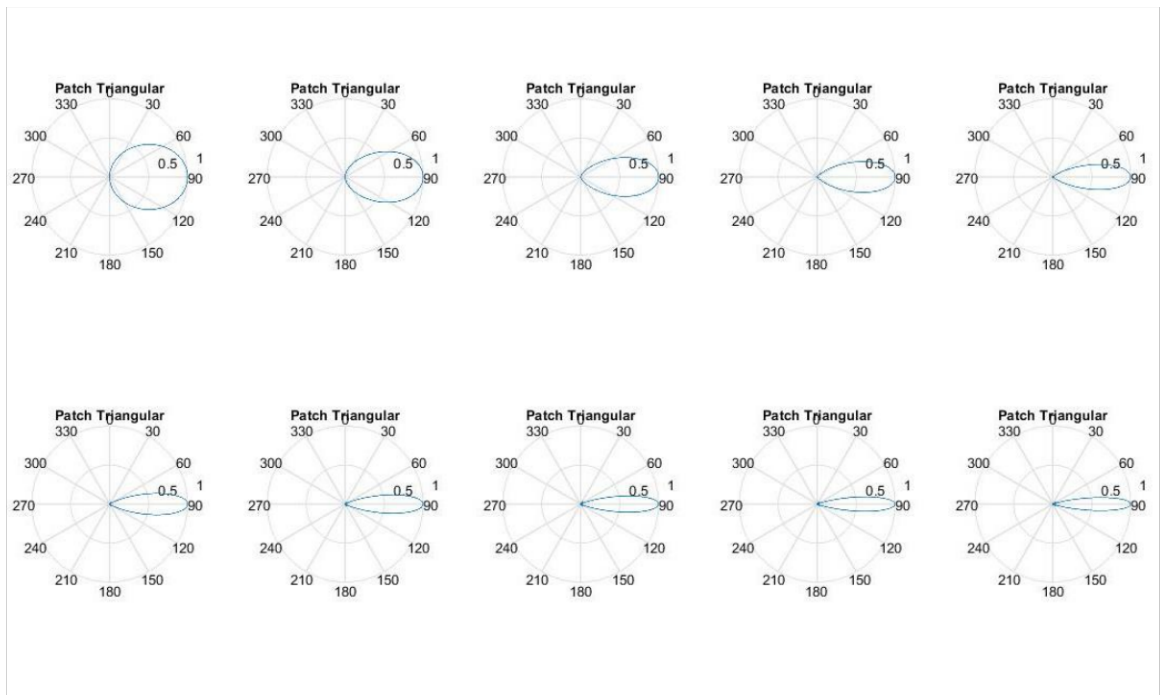
**Figura 2.14** Gráficos polares de magnitud vs ángulo para  $N = 5$  para arreglos de antenas dipolo con distribución de corriente triangular.



**Figura 2.15** Gráficos polares de magnitud vs ángulo para  $N = 5$  para arreglos de antenas *patch* con distribución de corriente uniforme.



**Figura 2.16** Gráficos polares de magnitud vs ángulo para  $N = 5$  para arreglos de antenas *patch* con distribución de corriente binomial.

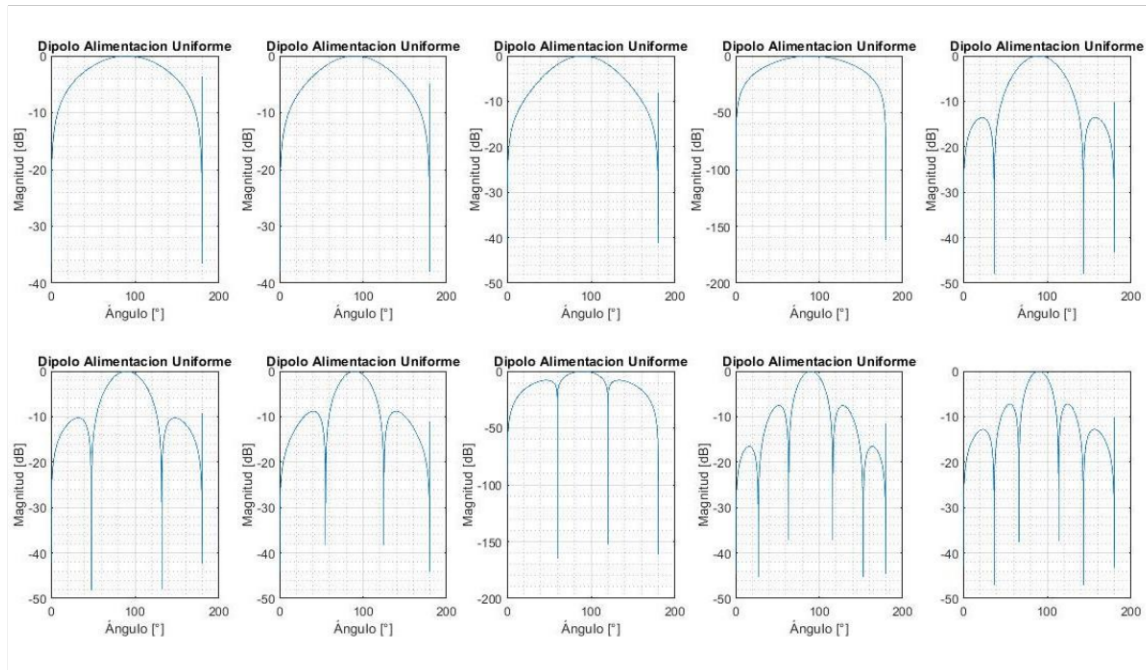


**Figura 2.17** Gráficos polares de magnitud vs ángulo para  $N = 5$  para arreglos de antenas *patch* con distribución de corriente triangular.

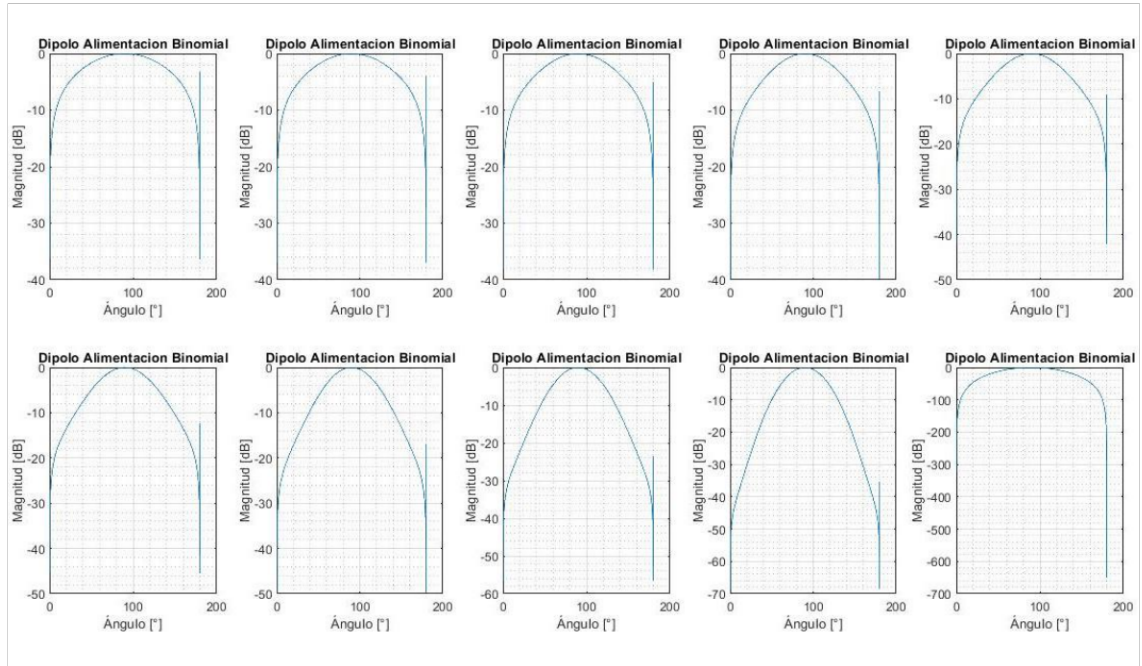
Como se puede observar en la Figura 2.9 a la Figura 2.17, al aplicar una distribución de corriente uniforme y aumentar la distancia entre elementos, la presencia de lóbulos

secundarios es cada vez más marcada, incrementando el nivel de SLL del patrón de radiación. En contra parte, al aplicar distribuciones de alimentación de corriente no uniformes (binomial y triangular) los lóbulos secundarios se suprimen, evitando el aumento del valor de SLL. Estos resultados tienen sentido al compararnos con la Figura 2.9 a la Figura 2.11, donde el diagrama de radiación del factor de arreglo de la distribución uniforme presenta múltiples lóbulos de radiación con magnitudes considerables. A diferencia de las distribuciones no uniformes, en donde la distribución triangular presenta lóbulos secundarios de magnitud inferiores a las de la distribución uniforme, y en la distribución binomial prácticamente no existen lóbulos secundarios.

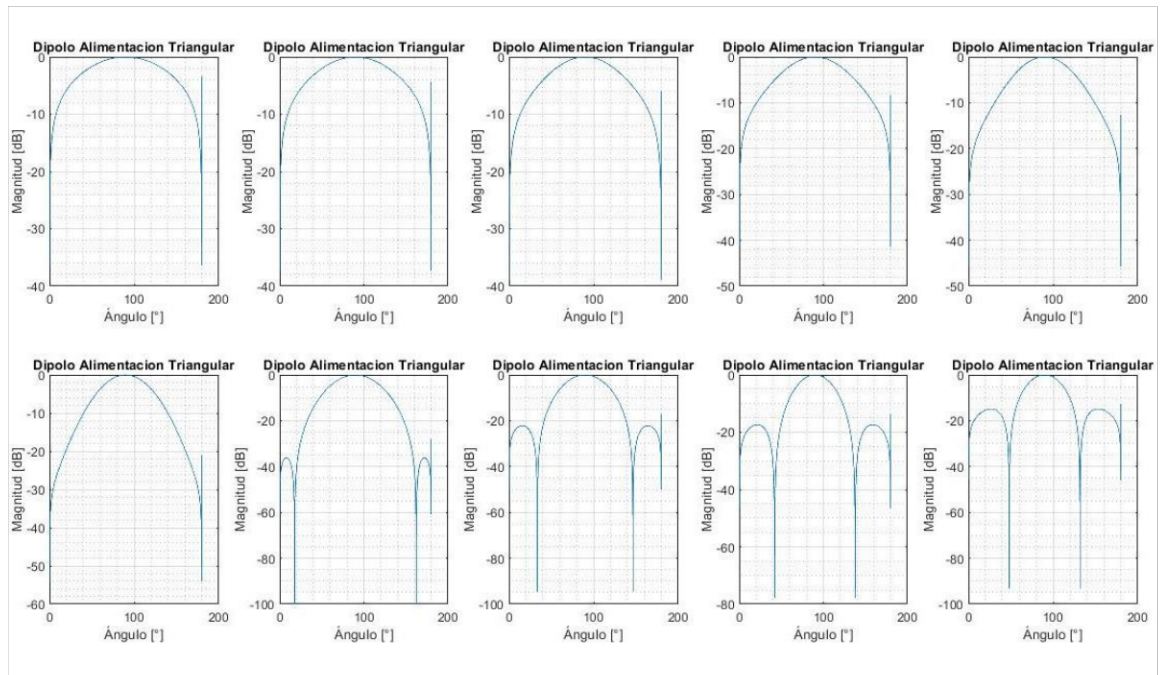
Para observar de mejor manera el SLL de los arreglos, se grafica la magnitud del campo vs el ángulo correspondiente, siguiendo un proceso similar al de la Figura 2.2. Obteniendo, para un  $N = 5$ , los resultados de las figuras de la Figura 2.18 a la Figura 2.23.



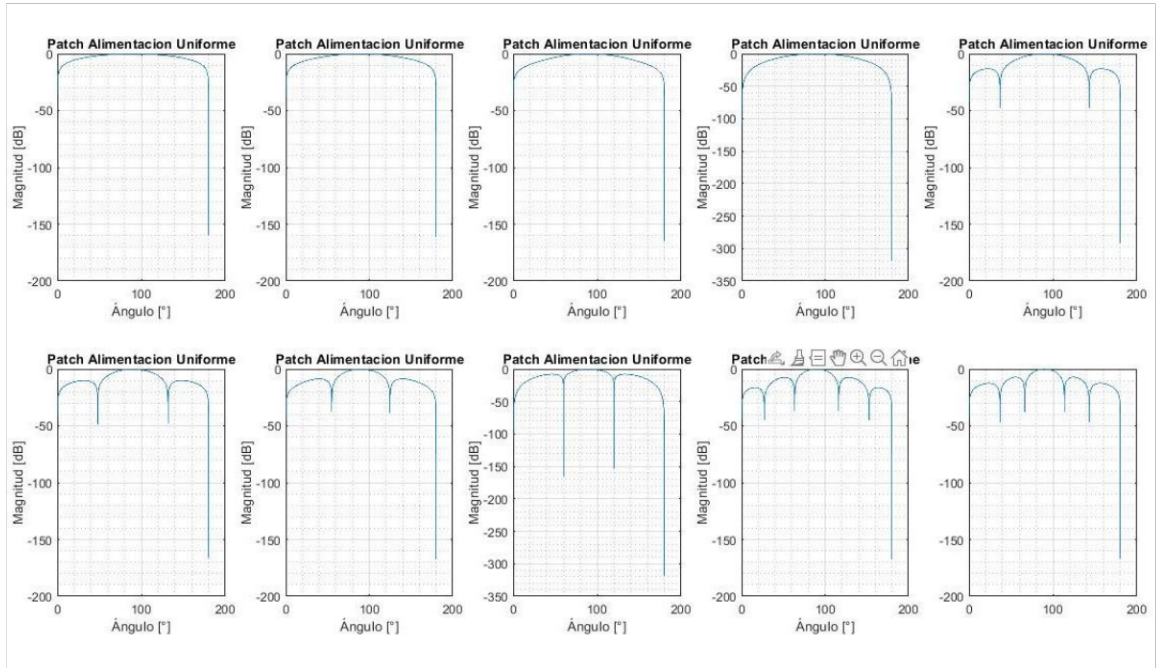
**Figura 2.18** Magnitud de campo eléctrico vs ángulo para arreglos de antenas tipo dipolo con distribución de alimentación uniforme.



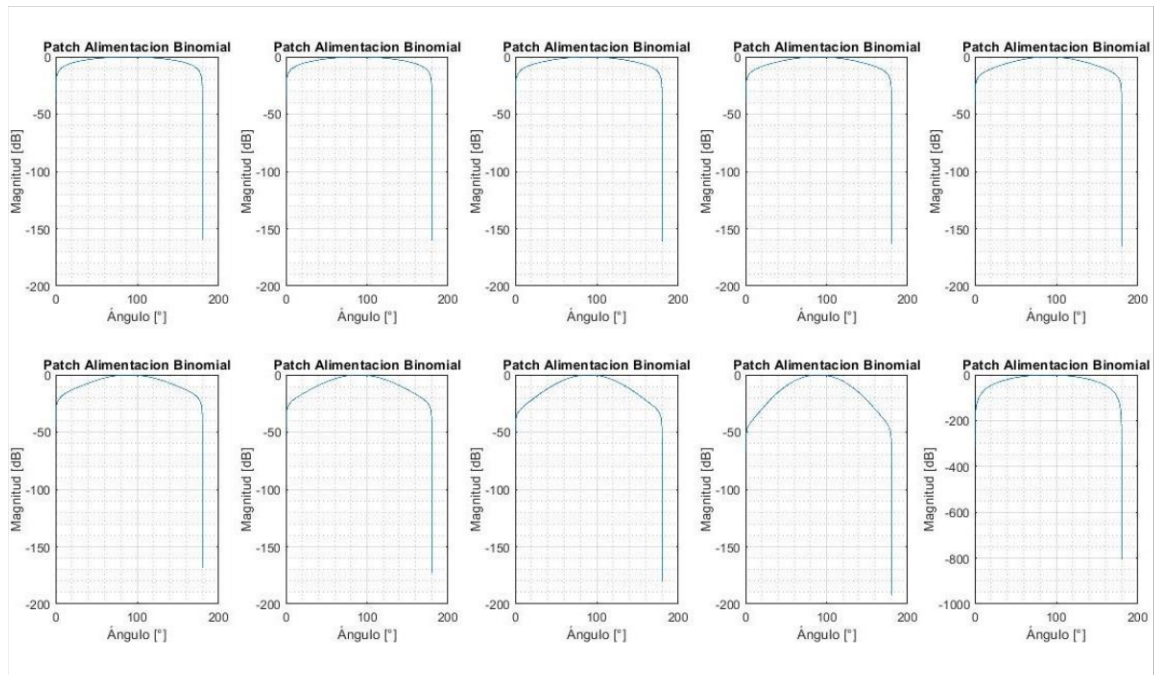
**Figura 2.19** Magnitud de campo eléctrico vs ángulo para arreglos de antenas tipo dipolo con distribución de alimentación binomial.



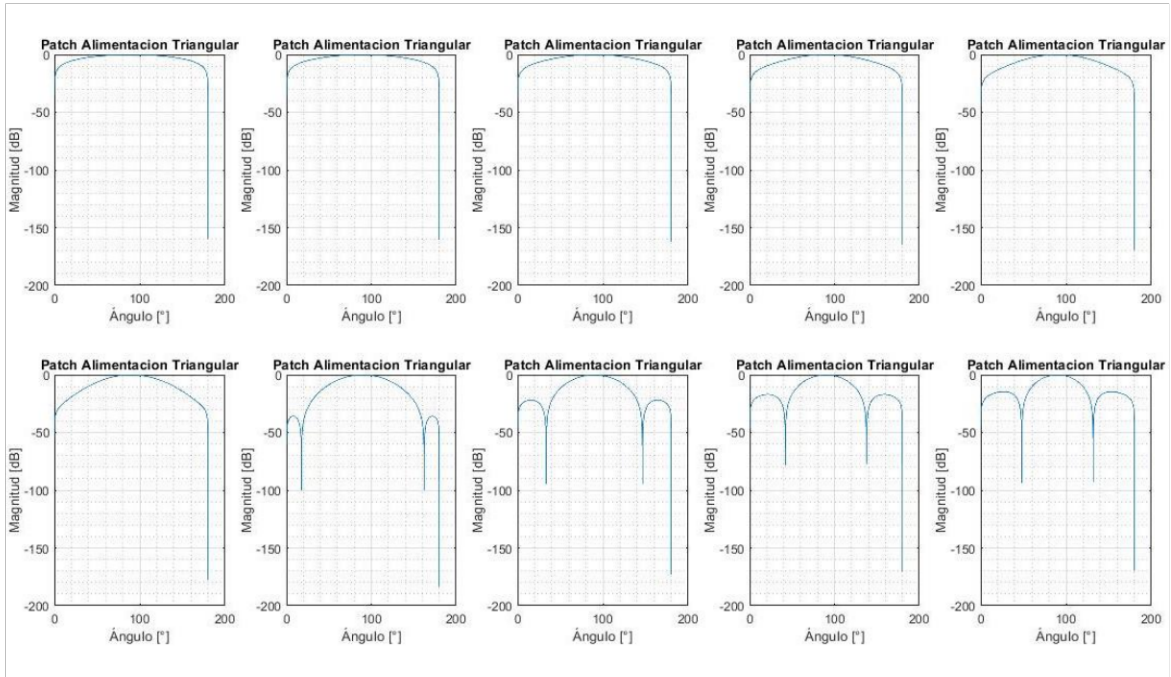
**Figura 2.20** Magnitud de campo eléctrico vs ángulo para arreglos de antenas tipo dipolo con distribución de alimentación triangular.



**Figura 2.21** Magnitud de campo eléctrico vs ángulo para arreglos de antenas tipo *patch* con distribución de alimentación uniforme.

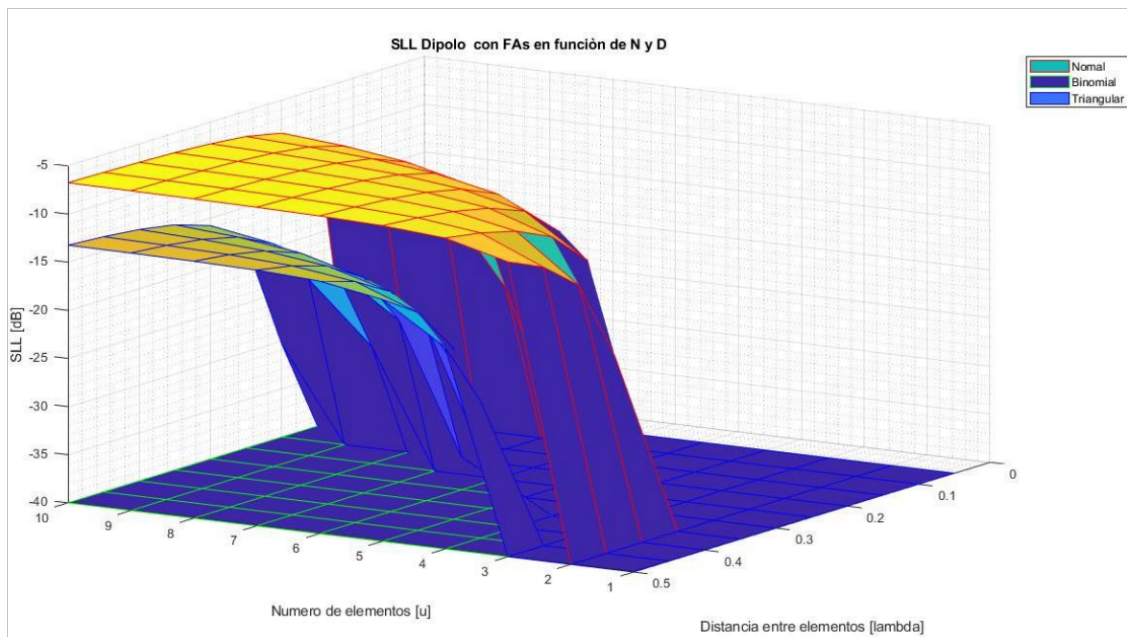


**Figura 2.22** Magnitud de campo eléctrico vs ángulo para arreglos de antenas tipo *patch* con distribución de alimentación binomial.



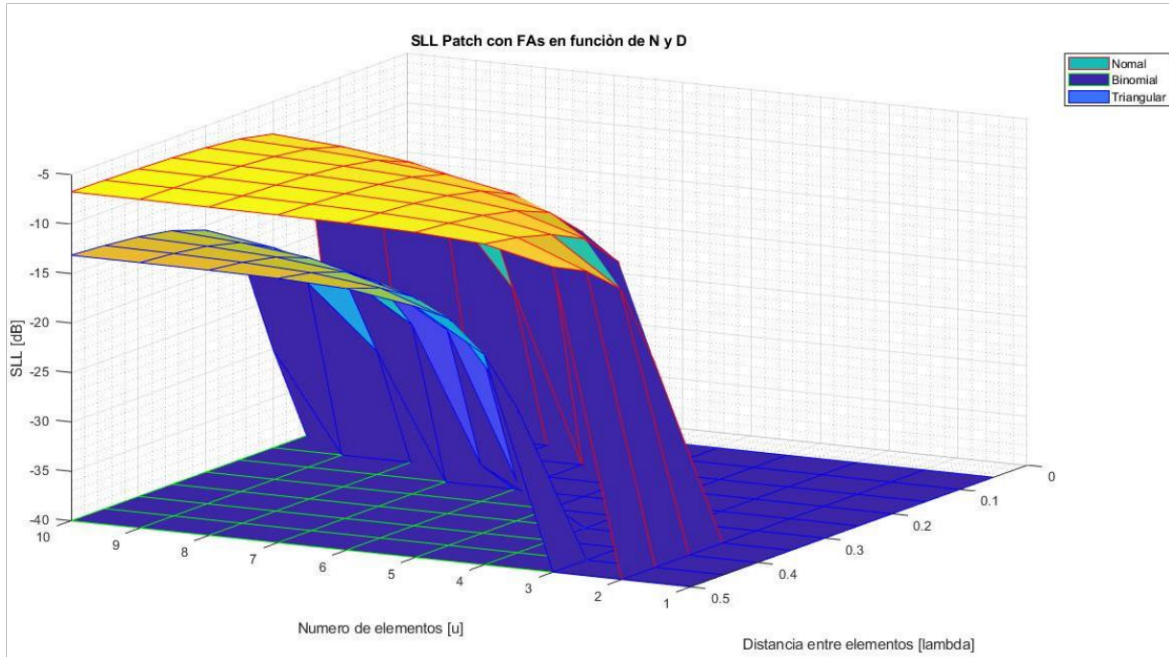
**Figura 2.23** Magnitud de campo eléctrico vs ángulo para arreglos de antenas tipo *patch* con distribución de alimentación triangular.

Para poder visualizar todo el conjunto de valores de SLL tomando en cuenta todas las posibles combinaciones de valores entre el campo,  $N$  y  $D$ ; se generan dos gráficos de superficie tridimensional, cada uno correspondiente al tipo de radiador, utilizando un proceso similar al de la Figura 2.7. Obteniendo los resultados presentes en las figuras Figura 2.24 y Figura 2.25.



**Figura 2.24** Gráfico SLL vs  $N$  vs  $D$  de arreglos de entenas tipo dipolo.





**Figura 2.25** Gráfico SLL vs N vs D de arreglos de antenas tipo *patch*.

De la Figura 2.24 y Figura 2.25 podemos observar que, para ambos casos, el incremento de la distancia entre elementos genera la aparición de lóbulos secundarios (como era de esperarse) a tal punto que los valores de SLL son comparables con los obtenidos en la Figura 2.7, que toma en cuenta únicamente radiadores isotrópicos.

Por otro lado, el incremento del número de elementos también genera el incremento de los valores de SLL, en ambos casos de estudio. Sin embargo, para los escenarios en donde el número de elementos es inferior a 5 se pueden alcanzar valores de SLL menores o iguales a -15 dB, inclusive en el caso crítico de la mayor separación de elementos.

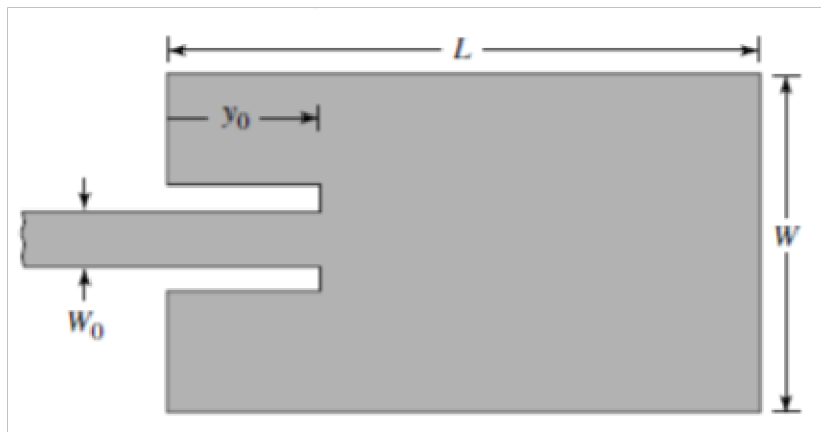
Analizando los resultados con referencia a los radiadores de estudio (antena dipolo de media longitud de onda y antena *patch*) se evidencia una clara similitud entre las magnitudes de los valores de SLL alcanzados. Por ende, la elección de la antena a ser implementada responde a criterios de facilidad de construcción. La antena *patch* presenta características óptimas para su elección como radiador base para el arreglo lineal de antenas propuesto, debido a su facilidad de diseño y conectorización.

Por lo tanto, el presente proyecto toma en consideración la implementación de un arreglo de 5 antenas tipo *patch*, en tecnología impresa, con una separación de  $\lambda/2$  entre radiadores.

## 2.2 DISEÑO DEL CIRCUITO EN TECNOLOGÍA IMPRESA

Tomando en cuenta las dimensiones de la antena tipo *patch* definidas en la sección anterior ( $L = 13,97$  mm,  $W = 18,43$  mm), se continua el diseño planteando una alimentación por línea *microstrip* para el radiador. Esta alimentación debe tomar en cuenta el acoplamiento de impedancias entre la línea *microstrip* y el elemento radiante.

Para tener un correcto acoplamiento de impedancias, se plantea un esquema de alimentación de línea *microstrip* con inserción, el cual se muestra en la Figura 2.26.



**Figura 2.26** Esquema de diseño de la antena en el circuito impreso [9].

En la Figura 2.26  $y_0$  representa la sección de inserción de la línea *microstrip* de alimentación que sirve para lograr una adaptación de impedancias.

La entrada de alimentación se realizará con un conector coaxial SMA de  $50 \Omega$  por facilidad en lo posterior para la realización de las mediciones. Entonces, la impedancia de entrada de alimentación ( $Z_{in\_feed}$ ) es igual a  $50 \Omega$ . La impedancia del radiador ( $Z_{in\_patch}$ ) se puede calcular mediante la ecuación (2.14) [8].

$$Z_{in\_patch} = \frac{90\epsilon_r^2}{\epsilon_r - 1} \left(\frac{L}{W}\right)^2 \quad (2.14)$$

Con  $\epsilon_r = 4,3$ , se tiene que  $Z_{in\_patch} = 289,83 \Omega$ . La sección  $y_0$  se determina con la ecuación (2.15) [8].

$$Z_{feed} = Z_{in\_patch} \cos^2\left(\frac{\pi y_0}{L}\right) \quad (2.15)$$

Por lo tanto, ya sección  $y_0$  tiene una longitud de  $y_0 = 5,07$  mm.

La línea de alimentación principal debe contar con una impedancia de 50 Ω. Para calcular el ancho de esta línea ( $W_{feed}$ ) se utiliza la ecuación (2.16) [8].

$$W_{feed} = \begin{cases} \frac{8he^4}{e^{2A} - 2} & W_{feed} \leq 2h \\ \frac{2h}{\pi} * \left[ B - 1 - \ln \ln(B - 1) + \left( \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \right) \ln \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] & W_{feed} > 2h \end{cases} \quad (2.16)$$

Donde  $A = \frac{Z_{in\_feed}}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)$  y  $B = \frac{377\pi}{2Z_{in\_feed}\sqrt{\epsilon_r}}$ . Asumiendo que  $W_{feed}$  es menor al doble de  $h$ , se tiene que  $A=1,52$ . Por lo tanto,  $W_{feed}=2,92$  mm.

La longitud de la línea de alimentación ( $L_{feed}$ ) corresponde a un cuarto de la longitud de onda efectiva, calculándose con la ecuación (2.17) [8].

$$L_{feed} = \frac{\lambda_{eff}}{4} = \frac{v}{4f_r\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.17)$$

Por lo tanto,  $L_{feed}=7,67$  mm.

Como resumen, se presenta la Tabla 2.1 con todas las dimensiones de la antena *patch*, con el sistema de alimentación y de acoplamiento.

**Tabla 2.1** Resumen de dimensiones físicas de la antena *patch* diseñada.

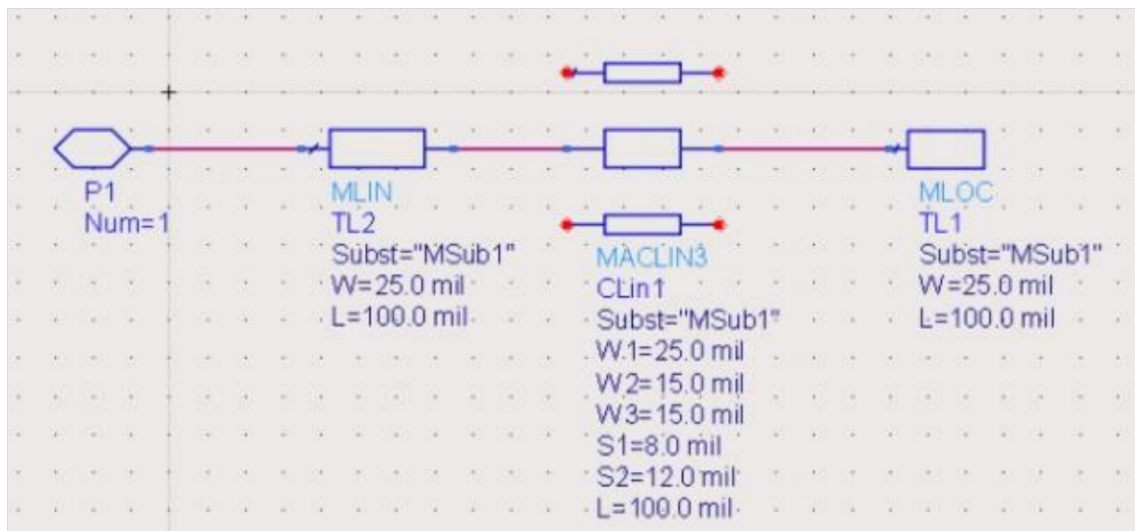
Parámetro	Longitud [mm]
Ancho de la antena (W)	18,43
Longitud de la antena (L)	13,97
Sección de $L_{acoplador}$ en L ( $y_0$ )	5,07
Ancho de la línea de alimentación ( $W_{feed}$ )	2,92
Longitud de la línea de alimentación ( $L_{feed}$ )	7,67

## 2.3 SIMULACIÓN EN KEYSIGHT® ADS

Keysight® ADS es una herramienta de simulación que permite la implementación de varios sistemas eléctricos y electrónicos con alta precisión, entre ellos, sistemas de radio frecuencia [10]. La librería “*Microstrip Components*” de la herramienta permite la implementación en diagrama de bloques de una estructura en tecnología impresa, ajustándose a las necesidades del presente proyecto. La implementación del arreglo de

antenas tipo *patch* en el software Keysight® ADS se realiza con el objetivo de obtener el archivo necesario para la implementación física de la estructura.

Los bloques funcionales a utilizar son: Port (puerto), MLIN (línea *microstrip*), MACLIN3 (línea *microstrip* de 3 conductores asimétricos acoplados), MLOC (terminal de circuito abierto *microstrip*). MLIN será el bloque funcional de la línea de transmisión de energía, MACLIN3 representa el sistema de acoplamiento de impedancias, MLOC corresponde al radiador tipo *patch* y Port indica el puerto de entrada de la corriente. Por lo tanto, se tiene un diagrama de bloques, para un solo radiador, presentado en la Figura 2.27.



**Figura 2.27** Diagrama de bloques de una antena *patch* individual.

Los parámetros de entrada de cada bloque son [8]:

MLOC

- $W = 18,43 \text{ mm}$
- $L = 13,97 \text{ mm}$

MACLIN3

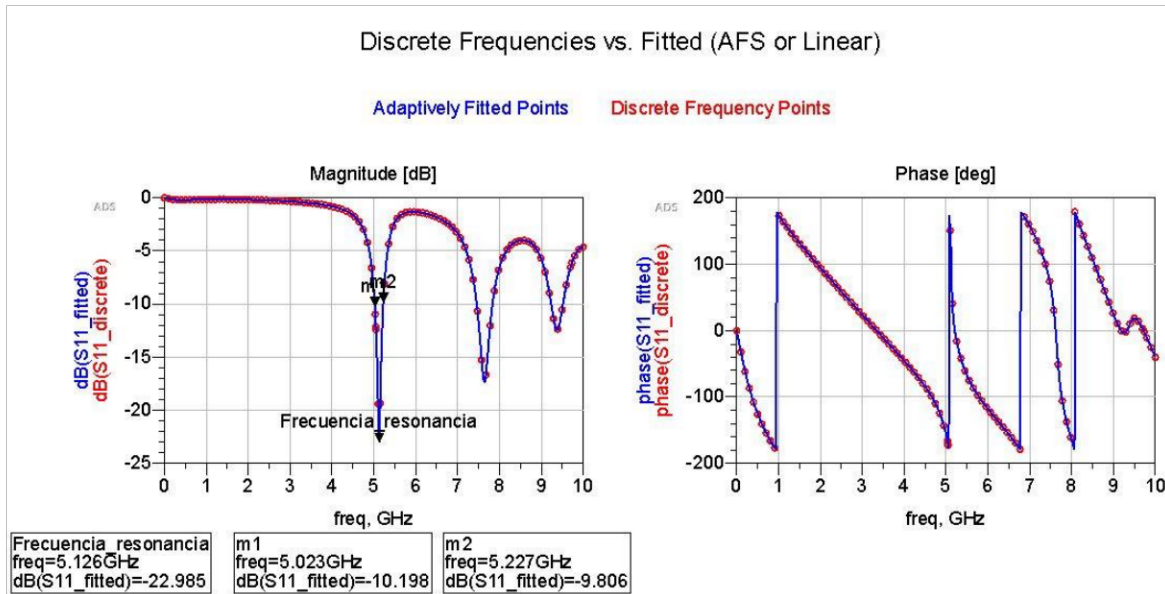
- $W_1 = W_3 = W \times 2/5 = 7,37 \text{ mm}$
- $W_2 = W_{\text{feed}} = 2,92 \text{ mm}$
- $S1 = S2 = \frac{W_1 - W_{\text{feed}}}{2} = 0,38 \text{ mm}$
- $L = y_0 = 5,07 \text{ mm}$

MLIN

- $W = 2,92 \text{ mm}$

- $L = 7,67$  mm

La Figura 2.28 muestra el resultado del parámetro  $S_{11}$  simulado con Keysight® ADS EM.

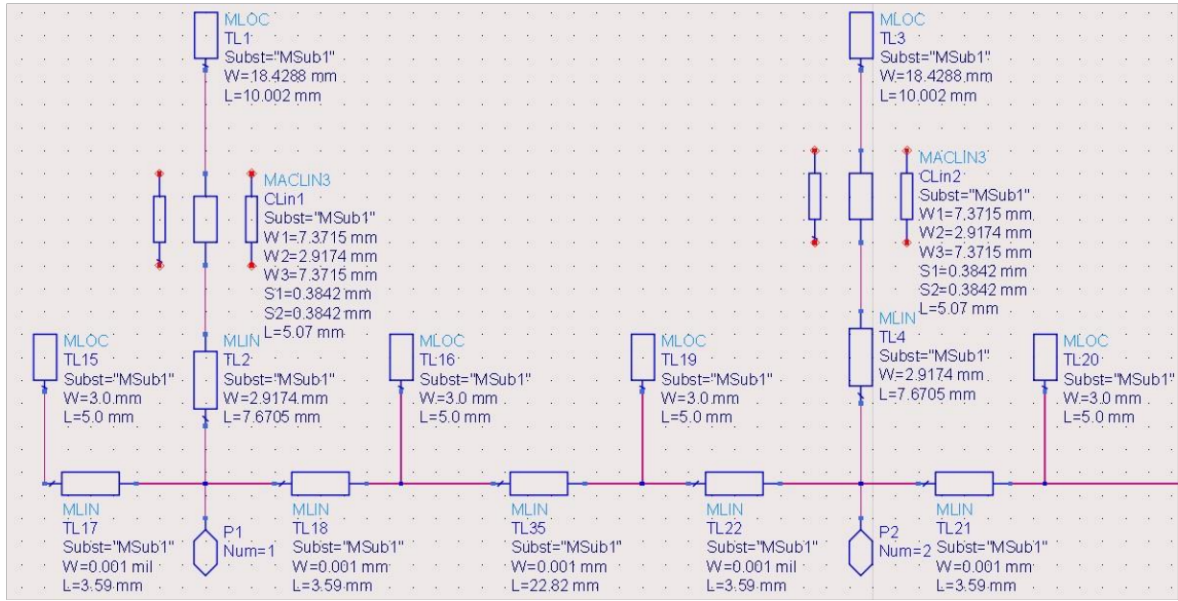


**Figura 2.28** Parámetro  $S_{11}$  de la antena *patch* simulada en Keysight® ADS.

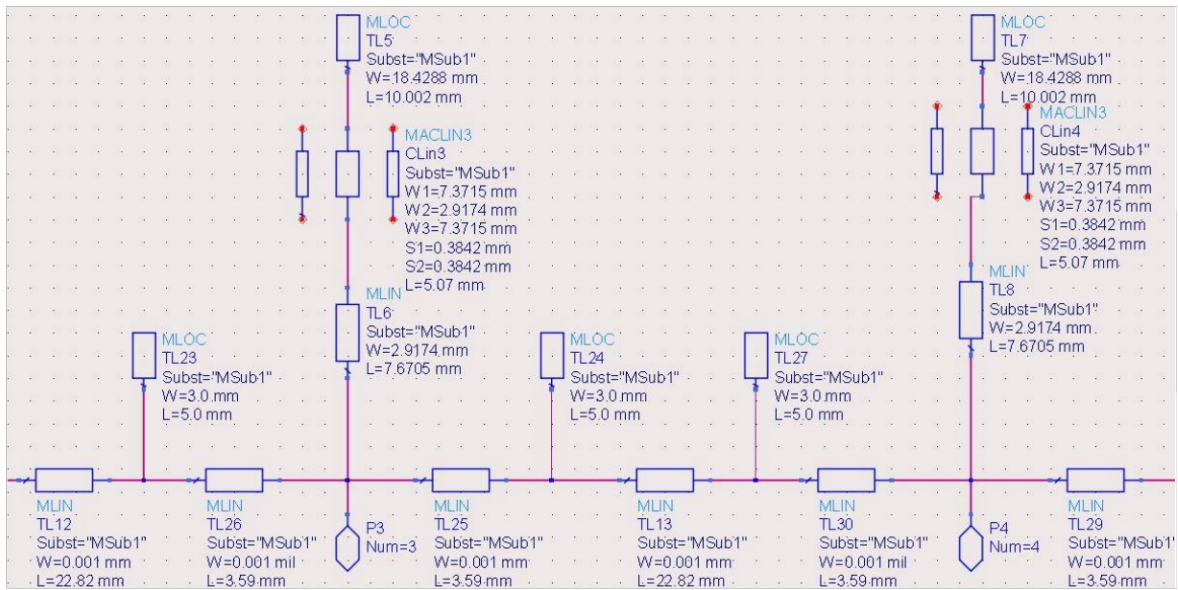
Se puede observar que el radiador tipo *patch* diseñado presenta resonancia a una frecuencia un poco mayor a la frecuencia objetivo (2,52% mayor). Esto puede resultar de los redondeos presentes en los resultados obtenidos en el diseño del radiador, debido a que se toma en consideración únicamente dos decimales para los cálculos.

El ancho de banda del elemento radiante es de, aproximadamente, 204 MHz. En porcentaje, tomando en cuenta la frecuencia objetivo, el ancho de banda representa un 4,08%. Por ende, se puede concluir que el elemento simulado presenta buenos resultados y es óptimo para la implementación física del sistema de antenas propuesto.

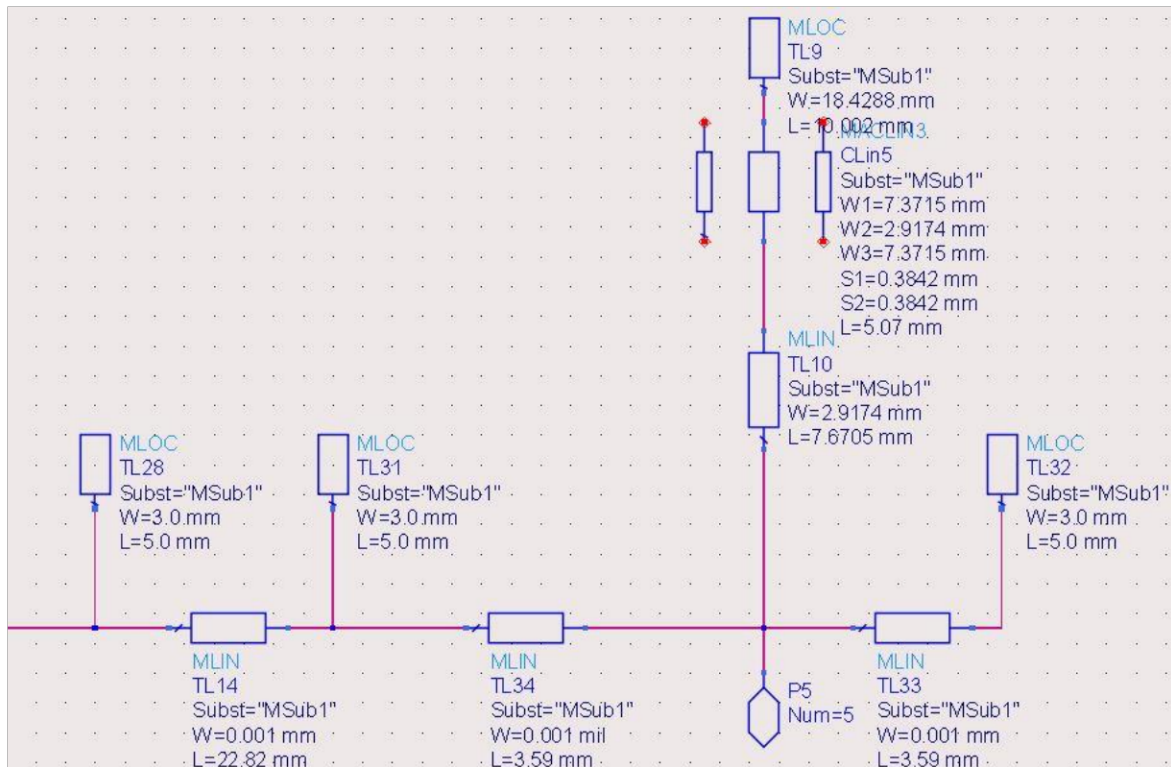
Una vez verificado el correcto funcionamiento (en simulación) del elemento radiante, se procede a modelar todo el arreglo de antenas. Como las antenas deben tener las mismas características físicas, se copia y pega el elemento individual hasta obtener el número de elementos deseados (5), como se muestra en la Figura 2.29. Nótese que los bloques MLIN sirven únicamente para establecer la distancia entre radiadores. Éstos serán retirados en el *layout* final.



(a)



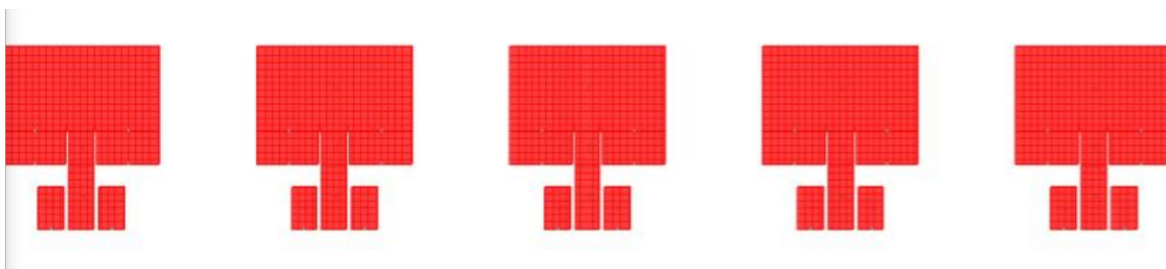
(b)



(c)

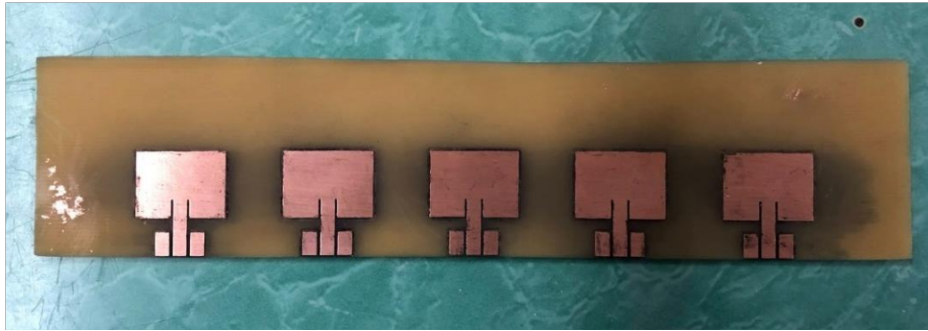
**Figura 2.29** Esquema de implementación en Keysight® ADS del arreglo lineal de antenas tipo patch: (a) primera parte, (b) segunda parte y (c) parte final.

El “layout” obtenido (sin los bloques MLIN no funcionales) se presenta la **Figura 2.30**.



**Figura 2.30** Layout implementado en Keysight® ADS del arreglo lineal de antenas tipo patch.

Con el *layout*, se procede a la implementación física. Para esto, se optó por hacer la separación de los elementos funcionales (antenas, líneas de transmisión y tomas a tierra) del resto de la placa mediante una máquina fresadora. Después, se removió el cobre de la placa que no era necesario. Una vez terminados los procesos se obtuvo los resultados presentados en las figuras Figura 2.31 y Figura 2.32.

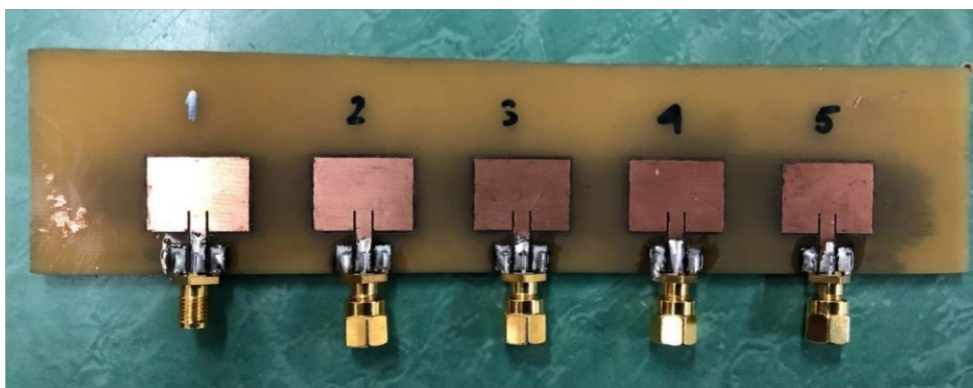


**Figura 2.31** Arreglo de antenas tipo *patch* implementadas en tecnología impresa (anverso).



**Figura 2.32** Arreglo de antenas tipo *patch* implementadas en tecnología impresa (reverso).

Una vez con el circuito impreso en físico, se procede a hacer la conectorización y la numeración de las antenas para su posterior medición tal como se muestra en la Figura 2.33.



**Figura 2.33** Arreglo de antenas tipo *patch* implementadas en tecnología impresa conectorizadas (anverso).

Finalmente, se realizan las mediciones correspondientes a cada antena, se recolectan los datos y se presentan los resultados.



# 3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Esta sección expone los resultados obtenidos en la medición de los parámetros S (para el caso de las antenas únicamente se analiza el parámetro  $S_{11}$ ) del arreglo de radiadores. Esto se realiza con el objetivo de determinar la correcta implementación física del sistema propuesto.

## 3.1 RESULTADOS

Para la obtención de los resultados se utilizó un analizador vectorial de redes. Este equipo permite la medición de parámetros vectoriales de dispersión de sistemas electrónicos en frecuencias de radio.

Después de la calibración del dispositivo de medición, se conectan a este las entradas de los radiadores del arreglo implementado, una por una, mientras la otras están conectadas a cargas acopladas de  $50 \Omega$ . Del equipo se obtienen gráficos del parámetro  $S_{11}$  de cada radiador, lo que permite analizar la correcta adaptación. Los resultados obtenidos se presentan en las figuras de la Figura 3.1 a la Figura 3.5.

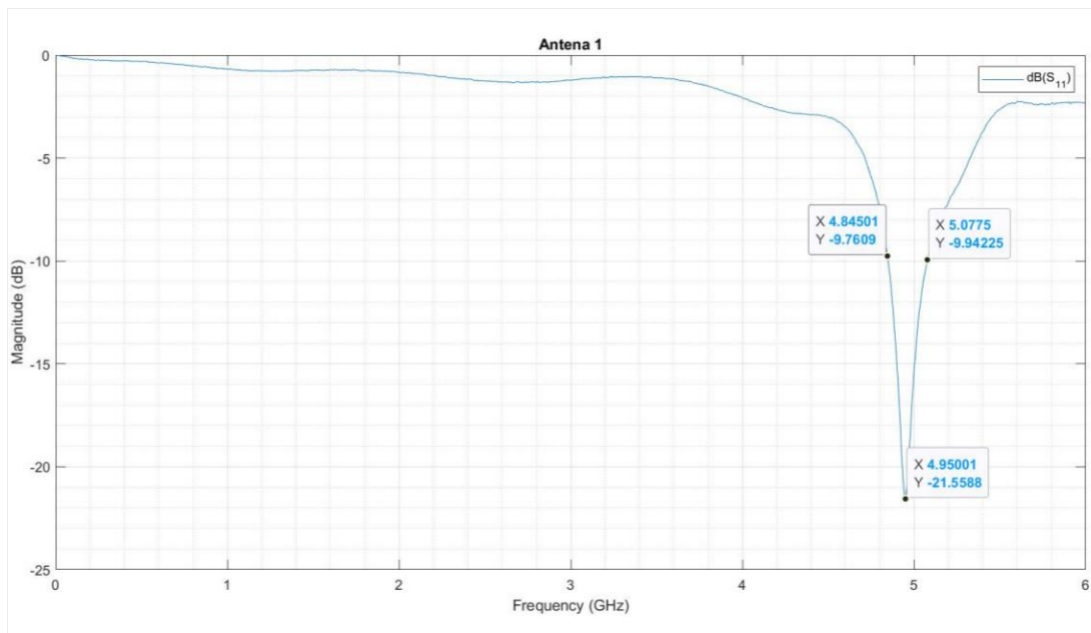
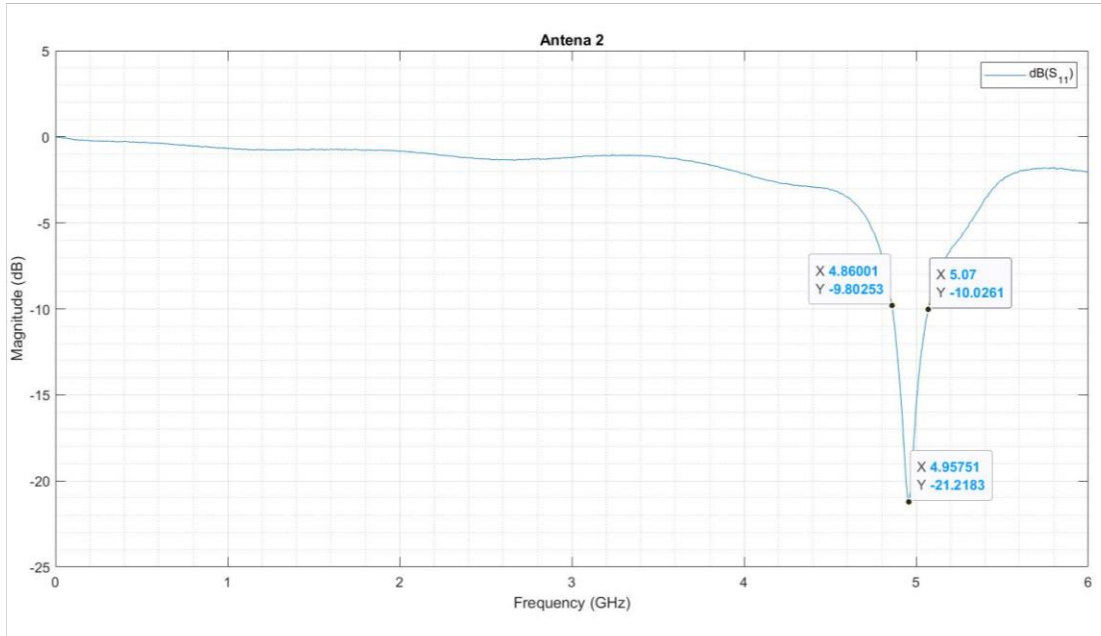
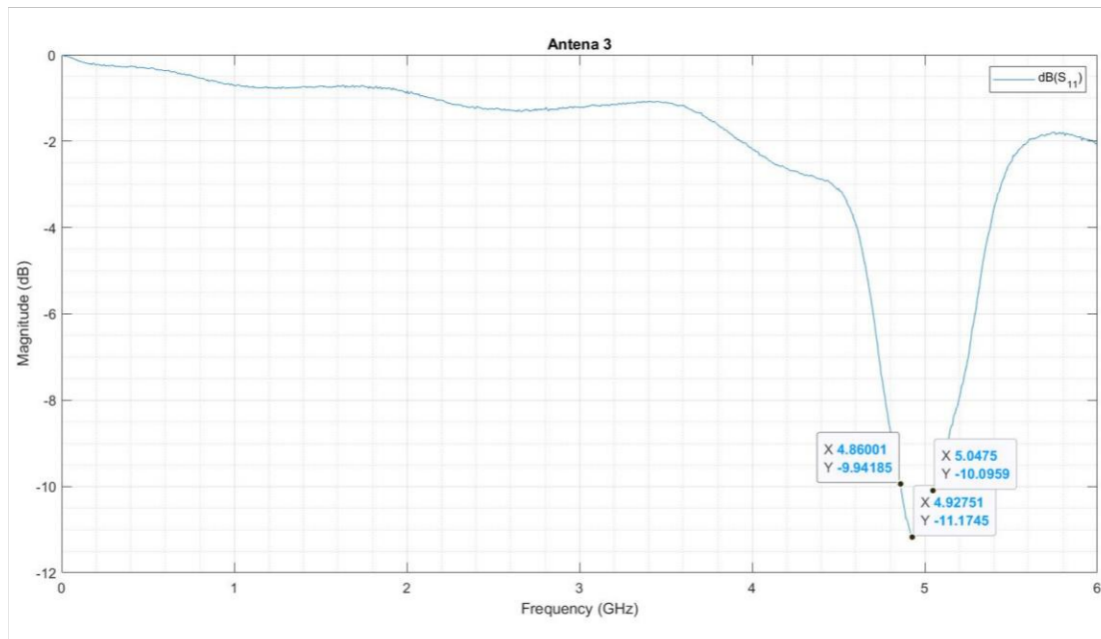


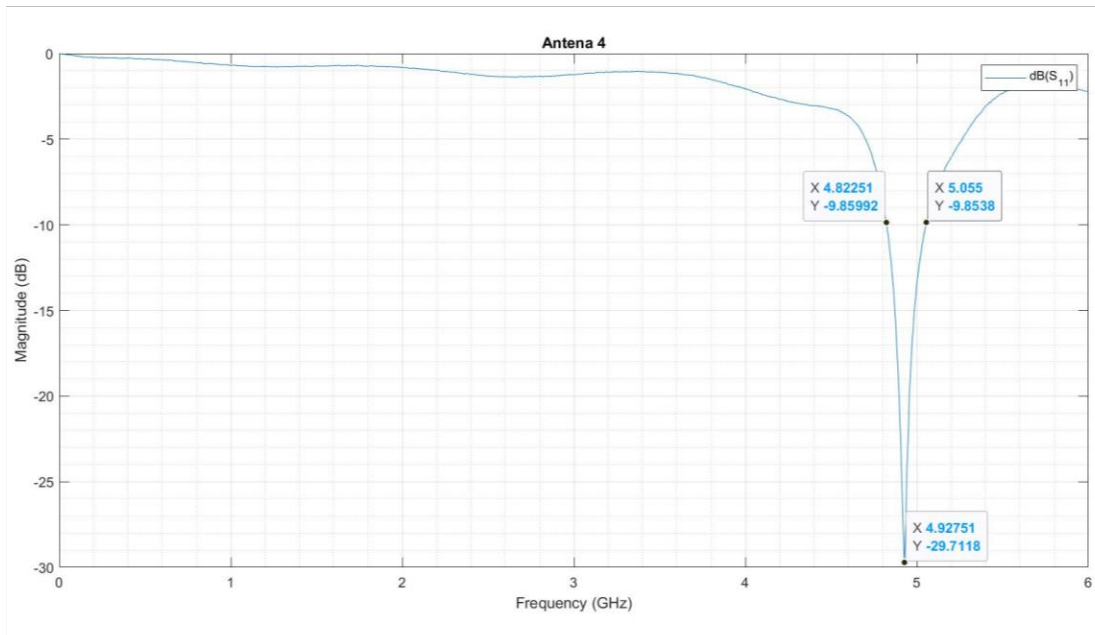
Figura 3.1 Parámetros  $S_{11}$  medido en la antena 1.



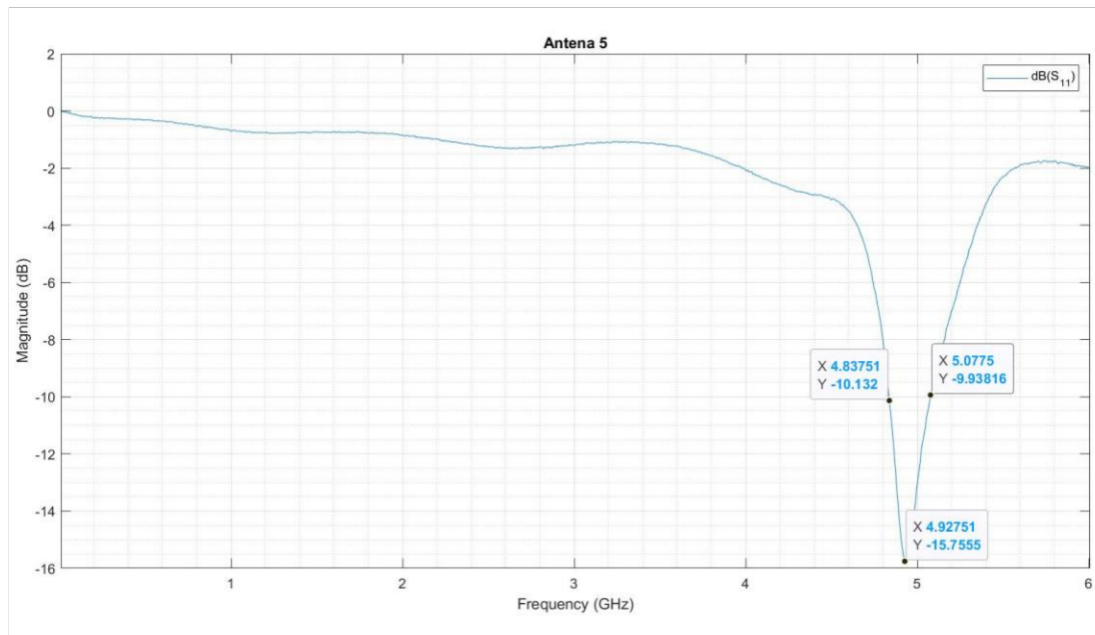
**Figura 3.2** Parámetros  $S_{11}$  medido en la antena 2.



**Figura 3.3** Parámetros  $S_{11}$  medido en la antena 3.



**Figura 3.4** Parámetros  $S_{11}$  medido en la antena 4.



**Figura 3.5** Parámetros  $S_{11}$  medido en la antena 5.

Una vista general de los resultados obtenidos en el arreglo lineal de antenas es un acoplamiento adecuado entre los elementos radiantes del sistema de alimentación. Esta conclusión surge del análisis del ancho de banda. En el caso más crítico, en la Figura 3.3, el ancho de banda de trabajo es de, aproximadamente, 187,5 MHz, lo que corresponde a un ancho de banda relativo del 3,74% (respecto 5 GHz, frecuencia central). Por ello, se puede afirmar que el ancho de banda relativo de cada una de las antenas no supera el 4%,

denotando un funcionamiento óptimo la frecuencia objetivo, en concordancia con el análisis de la simulación de la antena tipo *patch* revisada en el capítulo anterior.

Analizando particularmente cada uno de los radiadores, se observa que en las figuras Figura 3.1, Figura 3.2, Figura 3.4 se tiene una relación de señal a onda reflejada (a su frecuencia de resonancia) menor a  $-20$  dB, lo que denota una buena adaptación de los radiadores a sus sistemas de alimentación. La Figura 3.3 presenta un valor de  $S_{11}$  superior a la de las gráficas anteriores. Esto puede deberse al acoplamiento mutuo radiante entre el radiador y sus homólogos vecinos, ya que éste se encuentra en el centro del arreglo. Este acoplamiento mutuo puede estar generando un desacoplamiento entre el radiador y su línea de alimentación.

La Figura 3.5 presenta un valor de  $S_{11}$  de aproximadamente  $-15$  dB. Si bien no es un valor óptimo, es suficiente para que se puede considerar una buena adaptación. El no alcanzar un menor valor de  $S_{11}$  puede deberse a las imperfecciones en la fabricación de la antena.

## 3.2 CONCLUSIONES

En el presente Trabajo de Integración Curricular se estudiaron esquemas de alimentación para arreglos lineales de antenas. Para un mejor entendimiento se revisó la literatura académica de la cual se consensaron tres artículos que ejemplifican con claridad la aplicación de este tipo de redes de alimentación.

Con la ayuda de MATLAB se analizó el comportamiento de las características de radiación de un arreglo conformados por 1 a 10 elementos alimentados con corrientes que responden a tres tipos de esquemas de alimentación, uniforme, triangular y binomial. El análisis se abordó presentando diferentes tipos de gráficas con el fin de comparar claramente las diferencias entre los SLL para cada esquema posible.

Para cada uno de lo esquemas de alimentación, además, se analizó el diagrama de radiación al multiplicar el factor de arreglo de elementos separados distancias entre  $0,05\lambda$  a  $0,5\lambda$  por el campo eléctrico lejano de dos antenas convencionales, un dipolo de media longitud de onda y una antena *patch*. De este análisis, se observó que ambas antenas exhibieron resultados similares en términos de SLL para los mismos valores de número de elementos y distanciamiento tomados en cuenta.

Para la implementación práctica, se escogió un radiador del tipo antena *patch* debido a su facilidad de implementación y fácil adaptación a una línea coaxial misma que es conveniente para la realización de mediciones.

La antena *patch* fue diseñada con la ayuda de la herramienta Keysight® ADS. A su vez, esta herramienta facilitó la realización de la estructura compuesta por 5 antenas similares en un arreglo lineal separadas una distancia de  $0,5\lambda$ .

El arreglo fue construido sobre sustrato FR4, conectorizado con elementos SMA y medido mediante un analizador vectorial de redes para la comprobación de su adaptación de impedancia por medio del parámetro  $S_{11}$ .

El prototipo construido respondió adecuadamente al objetivo planteado con lo que, en conjunto con el componente paralelo al presente proyecto, el arreglo de antenas aquí realizado será de utilidad en la demostración de esquemas de alimentación no uniforme.

### **3.3 RECOMENDACIONES**

Se recomienda para el presente proyecto la utilización de una interfaz GUI con el fin de manipular de mejor manera la obtención de resultados para un análisis dinámico de las características obtenidas.

De igual manera, se recomienda la realización del prototipo con tecnología profesional para evitar errores en la fabricación lo que podría afectar a los resultados.

Se sugiere en trabajos futuros analizar en primer lugar un incremento de los elementos del arreglo, así como el distanciamiento entre ellos. Por otro lado, sería conveniente abordar otros esquemas de alimentación no uniforme.

En tanto a la realización del prototipo, se recomienda en un trabajo futuro realizar las medidas del diagrama de radiación del arreglo de antenas en una cámara anecoica.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Balanis, *ANTENNA THEORY ANALYSIS AND DESIGN*, Third edition. WILEY-INTERSCIENCE, 2005.
- [2] T. Varum, J. Matos, P. Pinho, y R. Abreu, «Non-uniform broadband circularly polarized antenna array for vehicular communications», *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, pp. 7219-7227, 2015.
- [3] Á. Cardama, L. Jofre, J. Ruis, J. Romeu, S. Blanch, y M. Ferrado, *Antenas*, Second edition. EDICIONS UPC, 2002.
- [4] M. Solaeché, «Sistema de Tabulación de Coeficientes Binomiales o Triangulares de Pascal: un Modelo Numérico Rasga el Telar de los Tiempos», *Divulgaciones Matemáticas*, vol. 6, pp. 61-68, 1998.
- [5] T. Djerafi y K. Wu, «CORRUGATED SUBSTRATE INTEGRATED WAVEGUIDE (SIW) ANTIPODAL LINEARLY TAPERED SLOT ANTENNA ARRAY FED BY QUASI-TRIANGULAR POWER DIVIDER», *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 26, pp. 139-151, 2012.
- [6] M. Panduro, A. Mendez, R. Dominguez, y G. Romero, «Desing of non-uniform circular antenna arrays for side lobe level reduction using the method of genetic algorithms», *International Journal of Electronics and Communications*, vol. 60, pp. 713-717, 2006.
- [7] D. Goldberg, *GENETIC ALGORITHMS in Search, Optimization & Machine Learning*. Addison-Wesley, 1989.
- [8] O. Tun, D. Aaron, y F. Roy, «Desing, Optimizing and Improvement of Microstrip 5G Patch Antenna Parameters Using Keysight Advanced Designed System (ADS)», *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1997, 2021.
- [9] P. Nawale y R. Zope, «Desing and Improvement of Microstrip Patch Antenna Parameters Using Defected Ground Structure», *Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 4, pp. 123-129, 2014.
- [10] C. Rocha, «DESARROLLO DE UNA INTERFAZ MATLAB PARA LA SIMULACIÓN, EN KEYSIGHT ADS, DE ESTRUCTURAS DIELECTRICAS NATURALES UNIDIMENSIONALES Y BIDIMENSIONALES EMULADAS POR MEDIO DE REDES DE CELDAS LC Y VERIFICACIÓN DE LAS MISMAS EN UNA APLICACIÓN RADIANTE CONVENCIONAL», Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador, 2019.

# **ANEXOS**

**ANEXO I** Código implementado en la herramienta MATLAB

# ANEXO I

```
clc;
clear all;
close all
% Constantes

Io=1;
Zo=377;
f=5e9;
lambda=3e8/f;
k=2*pi/lambda;
r=1; %Preguntar
phase=0;
kk=1;
c=3e8;
er=4.3;

% Variables
dis=0.05:0.05:0.5;
d=dis*lambda;
N=1:10;
theta=linspace(0,pi,10000);
phi=linspace(0,2*pi,10000);

%% Campo Dipolo
E_dipolo=((i*Zo*Io*exp(-i*k*r))/(2*pi*r)).*cos(pi.*cos(theta)/2)./sin(theta);

%% Campo Patch
W=(c/(2*f))*sqrt(2/(er+1));
h=1.5e-3;
e_eff=((er+1)/2)+(((er-1)/2)*(1+12*(h/W))^(-0.5));
vari_L=h*(0.412*(((e_eff+0.3)*(W/h + 0.264))/((e_eff-0.258)*(W/h - 0.8))));
L_eff=c/(2*f*sqrt(e_eff));
L=L_eff - 2*vari_L;
phi_patch=0;
for j=1:length(theta)
    if theta(1,j)>0 || theta(1,j)<pi
        E_patch(1,j)=((i*2*h*Io*exp(-i*k*r))/(pi*r)).*(sin(theta(1,j))./cos(theta(1,j))).*
        *sin(((k*W)/2).*cos(theta(1,j))).*cos(((k*L_eff)/2).*sin(theta(1,j))).*sin(phi_patch));
    else
        E_patch(1,j)=0;
    end
end

%% Factores de arreglo, Directividad y SLL
for j=1:length(d)
    %% Factores de arreglo
    for jj=1:length(N)
        Psi=k*d(j).*cos(theta)+phase;
        FAN{1,j}(jj,:)=sin(N(jj).*Psi/2)./sin(Psi./2); %Misma alimentacion
        FAB{1,j}(jj,:)=abs(2.*cos(Psi./2)).^(N(jj)-1); %Alimentacion Binomial
        FAT{1,j}(jj,:)=abs(sin((N(jj)+1).*Psi/4)./sin(Psi./2)).^2; %Alimentacion Triangular

        %% SLL
        SLL_N{1,j}(jj,:)=10.*log10(FAN{1,j}(jj,:)/max(FAN{1,j}(jj,:)));
        SLL_B{1,j}(jj,:)=10.*log10(FAB{1,j}(jj,:)/max(FAB{1,j}(jj,:)));
        SLL_T{1,j}(jj,:)=10.*log10(FAT{1,j}(jj,:)/max(FAT{1,j}(jj,:)));

    end
end

%% Graficos SLL FAs
kk=1;
```



```

close all;
aux=input('Escoger N: ');
for j=1:length(d)
    %% SLL Alimentacion Uniforme
    figure(1)
    subplot(2,5,kk)
    plot(SLL_N{1,j}(aux,:), linspace(0,180,10000));
    grid on
    grid minor
    title('Alimentacion Uniforme');
    ylabel('Ángulo [°]')
    xlabel('Magnitud [dB]')
    view(90,-90);

    %% SLL Alimentacion Binomial
    figure(2)
    subplot(2,5,kk)
    plot(SLL_B{1,j}(aux,:), linspace(0,180,10000));
    grid on
    grid minor
    title('Alimentacion Binomial');
    ylabel('Ángulo [°]')
    xlabel('Magnitud [dB]')
    view(90,-90);

    %% SLL Alimentacion Triangular
    figure(3)
    subplot(2,5,kk)
    plot(SLL_T{1,j}(aux,:), linspace(0,180,10000));
    grid on
    grid minor
    title('Alimentacion Triangular');
    ylabel('Ángulo [°]')
    xlabel('Magnitud [dB]')
    view(90,-90);
    kk=kk+1;
end

%% Valor SLL FAs y grafico de superficie
kk=1;
aux2=0;
close all;
for j=1:length(d)
    for jj=1:length(N)
        %% Uniforme
        [peaks, loc]=findpeaks(real(SLL_N{1,j}(jj,1:5560)));
        if length(peaks)<=1
            SLL_N_V(j,jj)=-30;
        else
            for aux=1:length(peaks)
                if peaks(1,aux)~=0
                    aux2(1,kk)=peaks(1,aux);
                    kk=kk+1;
                end
            end
            SLL_N_V(j,jj)=max(aux2);
            aux2=0;
            kk=1;
        end
        %% Binomial
        [peaks, loc]=findpeaks(real(SLL_B{1,j}(jj,1:5560)));
        if length(peaks)<=1
            SLL_B_V(j,jj)=-30;
        end
    end
end

```

```

        else
            for aux=1:length(peaks)
                if peaks(1,aux)~=0
                    aux2(1, kk)=peaks(1,aux);
                    kk=kk+1;
                end
            end
            SLL_B_V(j, jj)=max(aux2);
            aux2=0;
            kk=1;
        end
        %% Triangular
        [peaks, loc]=findpeaks(real(SLL_T{1, j}(jj, 1:5560)));
        if length(peaks)<=1
            SLL_T_V(j, jj)=-30;
        else
            for aux=1:length(peaks)
                if peaks(1,aux)~=0
                    aux2(1, kk)=peaks(1,aux);
                    kk=kk+1;
                end
            end
            SLL_T_V(j, jj)=max(aux2);
            aux2=0;
            kk=1;
        end
    end
end

for j=1:length(N)
    Nplot(j, :)=N;
end

for j=1:length(d)
    dplot(j, :)=dis(j)+zeros(1, length(d));
end
dplot=dplot;
figure(1)
surf(Nplot, dplot, SLL_N_V, 'EdgeColor', 'r');
hold on
surf(Nplot, dplot, SLL_B_V, 'EdgeColor', 'g');
surf(Nplot, dplot, SLL_T_V, 'EdgeColor', 'b');
grid minor
xlabel('Numero de elementos [u]')
ylabel('Distancia entre elementos [lambda]')
zlabel('SLL [dB]')
legend('Nomal', 'Binomial', 'Triangular')
title('SLL de factores de arreglo en función de N y D')

%% Graficos FAs
kk=1;
close all;
aux=input('Escoger N: ');
for j=1:length(d)
    %% Alimentacion Uniforme
    figure(1)
    subplot(2,5, kk)
    polar(theta, FAN{1, j}(aux, :)./max(FAN{1, j}(aux, :)));
    grid on
    view(90, -90)
    title('Alimentacion Uniforme');

    %% Alimentacion Binomial

```

```

figure(2)
subplot(2,5,kk)
polar(theta,FAB{1,j}(aux,:)./max(FAB{1,j}(aux,:)));
grid on
view(90,-90)
title('Alimentacion Binomial');

%% Alimentacion Triangular
figure(3)
subplot(2,5,kk)
polar(theta,FAT{1,j}(aux,:)./max(FAT{1,j}(aux,:)));
grid on
view(90,-90)
title('Alimentacion Triangular');
kk=kk+1;

end

%% Campos antenas con FA y SLL
for j=1:length(d)
    for jj=1:length(N)
        %% Dipolo
        E_dipolo_N{1,j}(jj,:)=(E_dipolo/max(E_dipolo(1,2:length(E_dipolo)))).*(FAN{1,j}(
(jj,:)./max(FAN{1,j}(jj,:)));
        E_dipolo_B{1,j}(jj,:)=(E_dipolo/max(E_dipolo(1,2:length(E_dipolo)))).*(FAB{1,j}(
(jj,:)./max(FAB{1,j}(jj,:)));
        E_dipolo_T{1,j}(jj,:)=(E_dipolo/max(E_dipolo(1,2:length(E_dipolo)))).*(FAT{1,j}(
(jj,:)./max(FAT{1,j}(jj,:)));

        SLL_N_D{1,j}(jj,:)=10.*log10(E_dipolo_N{1,j}(jj,:)/max(E_dipolo_N{1,j}(jj,:)));
        SLL_B_D{1,j}(jj,:)=10.*log10(E_dipolo_B{1,j}(jj,:)/max(E_dipolo_B{1,j}(jj,:)));
        SLL_T_D{1,j}(jj,:)=10.*log10(E_dipolo_T{1,j}(jj,:)/max(E_dipolo_T{1,j}(jj,:)));
        %% Patch
        E_patch_N{1,j}(jj,:)=(E_patch/max(E_patch(1,2:length(E_dipolo)))).*FAN{1,j}(
(jj,:)./max(FAN{1,j}(jj,:)));
        E_patch_B{1,j}(jj,:)=(E_patch/max(E_patch(1,2:length(E_dipolo)))).*FAB{1,j}(
(jj,:)./max(FAB{1,j}(jj,:)));
        E_patch_T{1,j}(jj,:)=(E_patch/max(E_patch(1,2:length(E_dipolo)))).*FAT{1,j}(
(jj,:)./max(FAT{1,j}(jj,:)));

        SLL_N_P{1,j}(jj,:)=10.*log10(E_patch_N{1,j}(jj,:)/max(E_patch_N{1,j}(jj,:)));
        SLL_B_P{1,j}(jj,:)=10.*log10(E_patch_B{1,j}(jj,:)/max(E_patch_B{1,j}(jj,:)));
        SLL_T_P{1,j}(jj,:)=10.*log10(E_patch_T{1,j}(jj,:)/max(E_patch_T{1,j}(jj,:)));
        %% Ranura
    end
end

%% Graficos E con FAs

kk=1;
close all;
aux=input('Escoger N: ');
for j=1:length(d)
    %% Dipolo con FAN
    figure(1)
    subplot(2,5,kk)
    polar(theta,E_dipolo_N{1,j}(jj,:));
    grid on
    view(90,-90)
    title('Dipolo Uniforme');

    %% Dipolo con FAB
    figure(2)

```

```

subplot(2,5,kk)
polar(theta,E_dipolo_B{1,j}(jj,:));
grid on
view(90,-90)
title('Dipolo Binomial');

```

```

%% Dipolo con FAT
figure(3)
subplot(2,5,kk)
polar(theta,E_dipolo_T{1,j}(jj,:));
grid on
view(90,-90)
title('Dipolo Triangular');

```

```

%% Patch con FAN
figure(4)
subplot(2,5,kk)
polar(theta,E_patch_N{1,j}(jj,:));
grid on
view(90,-90)
title('Patch Uniforme');

```

```

%% Patch con FAB
figure(5)
subplot(2,5,kk)
polar(theta,E_patch_B{1,j}(jj,:));
grid on
view(90,-90)
title('Patch Binomial');

```

```

%% Patch con FAT
figure(6)
subplot(2,5,kk)
polar(theta,E_patch_T{1,j}(jj,:));
grid on
view(90,-90)
title('Patch Triangular');
kk=kk+1;

```

end

```

%% Graficos SLL E con FAs
kk=1;
close all;
aux=input('Escoger N: ');
for j=1:length(d)
    %% SLL Alimentacion Uniforme Dipolo y Patch
    figure(1)
    title('Dipolo Alimentacion Uniforme');
    ylabel('Ángulo [°]')
    xlabel('Magnitud [dB]')
    subplot(2,5,kk)
    plot(SLL_N_D{1,j}(aux,:),linspace(0,180,10000));
    grid on
    grid minor
    view(90,-90)

    figure(2)
    title('Patch Alimentacion Uniforme');
    ylabel('Ángulo [°]')
    xlabel('Magnitud [dB]')
    subplot(2,5,kk)
    plot(SLL_N_P{1,j}(aux,:),linspace(0,180,10000));

```

```

grid on
grid minor
view(90,-90)

%% SLL Alimentacion Binomial Dipolo y Patch
figure(3)
subplot(2,5,kk)
plot(SLL_B_D{1,j}(aux,:),linspace(0,180,10000));
grid on
grid minor
view(90,-90)
title('Dipolo Alimentacion Binomial');
ylabel('Ángulo [°]')
xlabel('Magnitud [dB]')

figure(4)
subplot(2,5,kk)
plot(SLL_B_P{1,j}(aux,:),linspace(0,180,10000));
grid on
grid minor
view(90,-90)
title('Patch Alimentacion Binomial');
ylabel('Ángulo [°]')
xlabel('Magnitud [dB]')

%% SLL Alimentacion Triangular
figure(5)
subplot(2,5,kk)
plot(SLL_T_D{1,j}(aux,:),linspace(0,180,10000));
grid on
grid minor
view(90,-90)
title('Dipolo Alimentacion Triangular');
ylabel('Ángulo [°]')
xlabel('Magnitud [dB]')

figure(6)
subplot(2,5,kk)
plot(SLL_T_P{1,j}(aux,:),linspace(0,180,10000));
grid on
grid minor
view(90,-90)
title('Patch Alimentacion Triangular');
ylabel('Ángulo [°]')
xlabel('Magnitud [dB]')
kk=kk+1;
end

%% Valor SLL E y FAs, y grafico de superficie
kk=1;
aux2=0;
close all;
for j=1:length(d)
    for jj=1:length(N)
        %% Uniforme
        %% Dipolo
        [peaks, loc]=findpeaks(real(SLL_N_D{1,j}(jj,1:5560)));
        if length(peaks)<=1
            SLL_N_D_V(j,jj)=-40;
        else
            for aux=1:length(peaks)
                if peaks(1,aux)~=0
                    aux2(1,kk)=peaks(1,aux);
                end
            end
        end
    end
    kk=kk+1;
end

```

```

        kk=kk+1;
    end
end
SLL_N_D_V(j,jj)=max(aux2);
aux2=0;
kk=1;
end

%Patch
[peaks,loc]=findpeaks(real(SLL_N_P{1,j}(jj,1:5560)));
if length(peaks)<=1
    SLL_N_P_V(j,jj)=-40;
else
    for aux=1:length(peaks)
        if peaks(1,aux)~=0
            aux2(1,kk)=peaks(1,aux);
            kk=kk+1;
        end
    end
    SLL_N_P_V(j,jj)=max(aux2);
    aux2=0;
    kk=1;
end

%% Binomial
%Dipolo
[peaks,loc]=findpeaks(real(SLL_B_D{1,j}(jj,1:5560)));
if length(peaks)<=1
    SLL_B_D_V(j,jj)=-40;
else
    for aux=1:length(peaks)
        if peaks(1,aux)~=0
            aux2(1,kk)=peaks(1,aux);
            kk=kk+1;
        end
    end
    SLL_B_D_V(j,jj)=max(aux2);
    aux2=0;
    kk=1;
end

%Patch
[peaks,loc]=findpeaks(real(SLL_B_P{1,j}(jj,1:5560)));
if length(peaks)<=1
    SLL_B_P_V(j,jj)=-40;
else
    for aux=1:length(peaks)
        if peaks(1,aux)~=0
            aux2(1,kk)=peaks(1,aux);
            kk=kk+1;
        end
    end
    SLL_B_P_V(j,jj)=max(aux2);
    aux2=0;
    kk=1;
end

%% Triangular
%Dipolo
[peaks,loc]=findpeaks(real(SLL_T_D{1,j}(jj,1:5560)));
if length(peaks)<=1
    SLL_T_D_V(j,jj)=-40;
else

```

```

        for aux=1:length(peaks)
            if peaks(1,aux)~=0
                aux2(1,kk)=peaks(1,aux);
                kk=kk+1;
            end
        end
        SLL_T_D_V(j,jj)=max(aux2);
        aux2=0;
        kk=1;
    end

    %Patch
    [peaks,loc]=findpeaks(real(SLL_T_P{1,j}(jj,1:5560)));
    if length(peaks)<=1
        SLL_T_P_V(j,jj)=-40;
    else
        for aux=1:length(peaks)
            if peaks(1,aux)~=0
                aux2(1,kk)=peaks(1,aux);
                kk=kk+1;
            end
        end
        SLL_T_P_V(j,jj)=max(aux2);
        aux2=0;
        kk=1;
    end
end

end
end

for j=1:length(N)
    Nplot(j,:)=N;
end

for j=1:length(d)
    dplot(j,:)=dis(j)+zeros(1,length(d));
end
dplot=dplot;
figure(1)
surf(Nplot,dplot,SLL_N_D_V,'EdgeColor','r');
hold on
surf(Nplot,dplot,SLL_B_D_V,'EdgeColor','g');
surf(Nplot,dplot,SLL_T_D_V,'EdgeColor','b');
grid minor
title('SLL Dipolo con FAs en funci3n de N y D')
xlabel('Numero de elementos [u]')
ylabel('Distancia entre elementos [lambda]')
zlabel('SLL [dB]')
legend('Nomal','Binomial','Triangular')

figure(2)
surf(Nplot,dplot,SLL_N_P_V,'EdgeColor','r');
hold on
surf(Nplot,dplot,SLL_B_P_V,'EdgeColor','g');
surf(Nplot,dplot,SLL_T_P_V,'EdgeColor','b');
grid minor
title('SLL Patch con FAs en funci3n de N y D')
xlabel('Numero de elementos [u]')
ylabel('Distancia entre elementos [lambda]')
zlabel('SLL [dB]')
legend('Nomal','Binomial','Triangular')
%% Pruebas
Antena1=sparameters('A1.s1p');

```

```
Antena2=sparameters('A2.s1p');
Antena3=sparameters('A3.s1p');
Antena4=sparameters('A4.s1p');
Antena5=sparameters('A5.s1p');
figure(1)
rfplot(Antena1)
hold on
grid minor
title('Antena 1')
figure(2)
rfplot(Antena2)
hold on
grid minor
title('Antena 2')
figure(3)
rfplot(Antena3)
hold on
grid minor
title('Antena 3')
figure(4)
rfplot(Antena4)
hold on
grid minor
title('Antena 4')
figure(5)
rfplot(Antena5)
hold on
grid minor
title('Antena 5')
```