

Diseño y análisis de arreglo lineal de antenas dipolo

Design and analysis of linear dipole antenna arrangement



Diseño y análisis de arreglo lineal de antenas dipolo¹

Design and analysis of linear dipole antenna arrangement

Ana Carolina Ramírez Cleves², Edgar Javier Mantilla Bautista³

^{2,3}Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia

Artículo recibido en enero de 2017; artículo aceptado en mayo de 2017

Citación del artículo: Ramírez, A. & Mantilla, E. (2017). Diseño y análisis de arreglo lineal de antenas dipolo.

I+D Revista de Investigaciones, 10(2) julio – diciembre de 2017, pp. 38 - 56

Resumen

Este artículo explora el método para realizar el diseño de un arreglo de antenas; el objetivo es verificar y modelar el patrón de radiación variando características como distancia y fase. Durante el proceso se analizan diferentes posibilidades de desarrollo que cumplan con la característica de ser un sistema funcional, de fácil acceso al público y sencillo de comprender. Como resultado, se obtuvo que el sistema que cumple con el objetivo inicial y las características anteriormente indicadas es un arreglo de antenas lineal uniforme con elementos dipolo lambda medios, para cuyo desarrollo se analizan las impedancias y el desfase de los elementos comprometidos en la carta de Smith, concluyendo que este sistema es práctico y de fácil comprensión comparado con métodos como la matriz de Butler. La estructura se fabrica con elementos utilizados a diario, cumpliendo con los requerimientos inicialmente planteados.

Palabras clave: espectrómetro, antena, impedancia, sumador, dipolo (tesauro Ecurad).

Abstract

This article explores the method for realizing the design of an array of antennas, the objective is to verify and model the pattern of radiation varying characteristics as distance and phase. During its process, different development possibilities that meet the objective of being a functional system with easy access and comprehension are analyzed. As a result, it was obtained that the system that meet the characteristics mentioned before is a uniform-linear antenna arrays with elements half-lambda dipole. Having this solution, an impedances and dephasing analysis is done with the involved elements through the Smith Chart, concluding that this system is practical as it does not require a complex design and uses daily used-elements, Compared to methods such as the Butler matrix. For the fabrication of the structure this is done with elements used daily, fulfilling the requirements initially raised.

Key words: spectrometer, antenna, impedance, adder, dipole (tesauro Ecurad).

1. Artículo de investigación, enfoque cualitativo, resultado de un proceso de investigación finalizado perteneciente al área de Ingeniería Telecomunicaciones, área Antenas y Propagación de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. PBX: (057) (1) 3239300. Sede principal: Carrera 7 n.º 40B - 53 (nueva dirección), Bogotá D. C. - (Colombia). Fecha de inicio: 1 de junio de 2016, fecha de finalización: 10 de enero de 2017.

2. Ingeniera en Telecomunicaciones, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Electrónica y Telecomunicaciones, Bogotá D. C. (Colombia). Orcid: 0000-0002-5054-6576. Correo: anacarolinaramirezcleves@hotmail.com.

3. Ingeniero electrónico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, M. Sc. Teleinformática, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Profesor Facultad de Electrónica y Telecomunicaciones. Bogotá D. C. (Colombia). Orcid: 0000-0003-1694-9520. Correo: emantillab@hotmail.com.

Un arreglo es una antena compuesta por varios elementos radiadores. Existen varios tipos de arreglos –lineales, planos, circulares, etcétera–, usados frecuentemente en el área de las telecomunicaciones. Dichos arreglos tienen como objetivo modelar las características de directividad de su radiación, haciéndolos más efectivos en el momento de transmitir y recibir su señal.

Para este proyecto se diseña un arreglo lineal de antenas dipolo, que puede ser empleado por el público en general para mejorar la calidad de la señal a recibir y transmitir. Se escogió este tipo de antena por ser sencilla y popular, ya que consiste en un hilo conductor de media longitud de onda a la frecuencia de trabajo. Como el objetivo de este proyecto es demostrar cómo modelar y verificar el patrón de radiación, este se obtiene modificando características como distancia y fase. Se analizaron las distintas posibilidades de diseño para crear arreglos de diferentes números de elementos dipolo lambda medios, y métodos como las matrices de Butler o la carta de Smith, utilizados para realizar el desfase entre cada uno de los elementos teniendo en cuenta características como la impedancia, el coeficiente de reflexión, la resistencia y la reactancia.

A continuación, se presenta un breve repaso por conceptos básicos para el diseño del mencionado arreglo, en el cual se detalla el diseño de una antena, el análisis matemático de su campo, el factor de arreglo y el uso de la carta de Smith para realizar el desfase entre los elementos radiadores. Por último, se observan el resultado y las conclusiones obtenidas, teniendo en cuenta que el sistema fue realizado en un entorno en el cual no se tiene una total aislación de ruido. Finalmente, se concluye que el arreglo realizado brinda un resultado muy aproximado al realizado en un entorno como una cámara anecoica, que es una sala diseñada para absorber en su totalidad las reflexiones producidas por ondas acústicas o electromagnéticas en cualquiera de las superficies que las conforman y con un arreglo realizado con elementos con pérdidas mínimas.

Método

Tipo de estudio

El estudio es de tipo no experimental explicativo, ya que pretende dar a comprender un fenómeno. Este tipo de estudio se concentra en la causa del evento y, por

Tabla 1
Especificaciones del analizador vectorial de red MS2024A

Características	Descripción
Rango de frecuencia	2 MHz a 4 GHz (operacional hasta 610 KHz)
Precisión de frecuencia	25 ppm
Resolución de frecuencia	10 Hz
Puntos de datos	Bajo, Medio, Alto (137/275/551)
Inmunidad a las interferencias	En el canal: +17dBm En frecuencia: 0 dBm (RF Out), +30dBm (RF In)
1-Port power	Alto: 0 dBm (Típico)
2-Port power	Alto: 0 dBm (Típico) Bajo: -35 dBm (Típico)
Directividad corregida	42 dB (2 MHz to 6 GHz)
1-Precisión del puerto	$= < 0.44 + 20 \log(1 \pm 10^{-E\Delta/20}) $ dB, Típico; $E\Delta$ = directividad – Pérdida de retorno medida
Rango dinámico	70 dB, 2 MHz to 10 MHz 80 dB, 10 MHz to 3 GHz 70 dB, >3 GHz to 5.5 GHz 65 dB, >5.5 GHz to 6 GHz
Pérdida de retorno	Rango: 0 to 60 dB Resolución 0.01 dB
VSWR	Rango: 1 to 65 Resolución 0.01
Pérdida de cable	Rango: 0 to 30 dB Resolución 0.01 dB
Fase de puerto	Rango: -180° to +180° Resolución: 0.01°
Carta de Smith	Resolución: 0.01
2-Ganancia de puerto	Rango: -120 to 100 dB Resolución: 0.01 dB

2-Fase de puerto

Rango: -180° to $+180^\circ$

Distancia a la falla

Resolución: 0.01°

Resolución de fallos (metros): $(1.5 \times 108 \times v_p) / \Delta F$; v_p es la constante de propagación y ΔF es $F_2 - F_1$ en Hz

Rango horizontal (metros): 0 a (data points-1) Resolución de fallos a un máximo de 1500m (4921 ft.) donde $data\ points = 137/275/551$

Rango vertical (pérdida de retorno): 0 to 60 dB

Rango vertical (VSWR): 1 to 65

Fuente: Anritsu, 2008

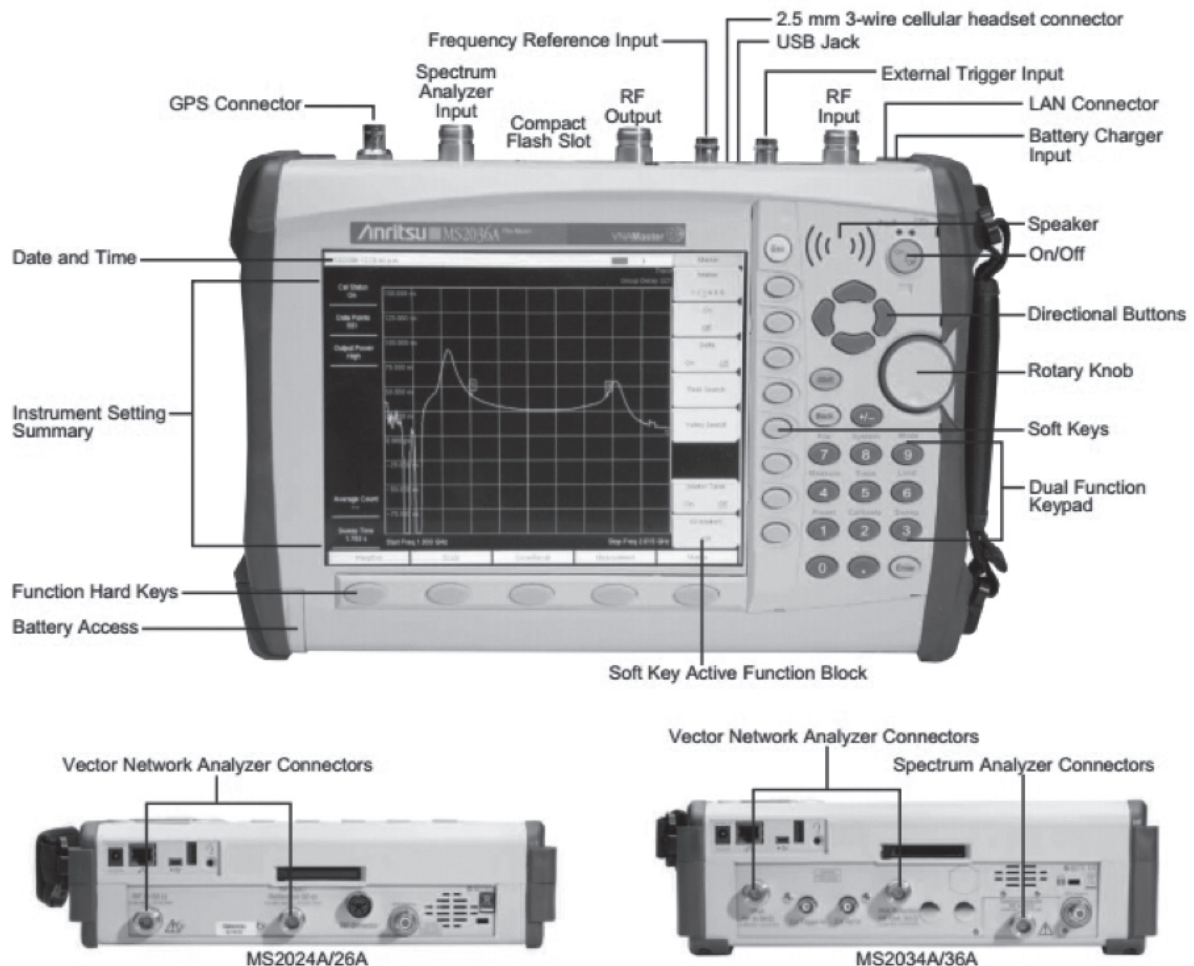


Figura 1.
 VNA Anritsu MS2024A.
 Fuente: Anritsu, 2008

lo tanto, está orientado a la identificación y el análisis causales y sus resultados, lo que se expresa en hechos verificables. Como se observará, el estudio se concentra en explicar el método para diseñar un arreglo de antenas

lineal dipolo lambda medios, así como en verificar que dicho método cumpla con el objetivo propuesto, el cual es lograr modelar su patrón de radiación a conveniencia.

Materiales e instrumentos

Analizador vectorial de red (VNA). El analizador vectorial de red, también llamado medidor de ganancia y fase, es tan funcional como la combinación entre un analizador de espectro y un generador de barrido. Comúnmente se encuentran de dos puertos, pero también pueden tener cuatro puertos. Su calibración es un proceso de alta precisión, en la cual se incluyen factores como la impedancia a la cual se está operando. El estándar de calibración usa cuatro dispositivos de prueba **Open** (red abierta), **Short** (red en corto circuito), **Load** (carga) y **Thru** (red conectada); los últimos dos dispositivos calibran la reflexión y la transmisión.

Analizador de espectro. Un analizador de espectro es un equipo de medición electrónico que permite visualizar en una pantalla las componentes de las señales presentes en la entrada en un espectro de frecuencias que podría ser cualquier tipo de ondas eléctricas, acústicas u ópticas. En el eje de ordenadas suele presentarse en una escala logarítmica el nivel en dBm del contenido espectral de la señal. En el eje de abscisas se representa la frecuencia, en una escala que es función de la separación temporal y el número de muestras captadas. Se denomina frecuencia central del analizador a la que corresponde con la frecuencia en el punto medio de la pantalla, la cual presenta el mismo comportamiento para su calibración que el analizador vectorial de espectro.

Tabla 2
Especificaciones del analizador de espectro MS2721B

Característica	Descripción
Frecuencia	9 kHz a 7.1 GHz
Medida	Ancho de banda ocupado, potencia de canal, ACPR, C/I
Analizador de interferencias	Espectrograma, intensidad de señal, RSSI
Rango dinámico	> 101 dB en 1 Hz RBW
DANL	-163 dBm in 1 Hz RBW
Ruido de fase	-95 dBc/Hz @ 10 kHz offset at 1 GHz
Precisión de frecuencia	< ± 25 ppb con GPS On
RBW	1 Hz a 3 MHz ancho de bando de resolución
Traza	normal, max hold, min hold, average, number of averages
Detectores	Pico, negativo, muestra, cuasipico y verdadero RMS
Marcadores	6, cada uno con marcador delta, o 1 referencia con seis deltas

Fuente: Anritsu, 2009

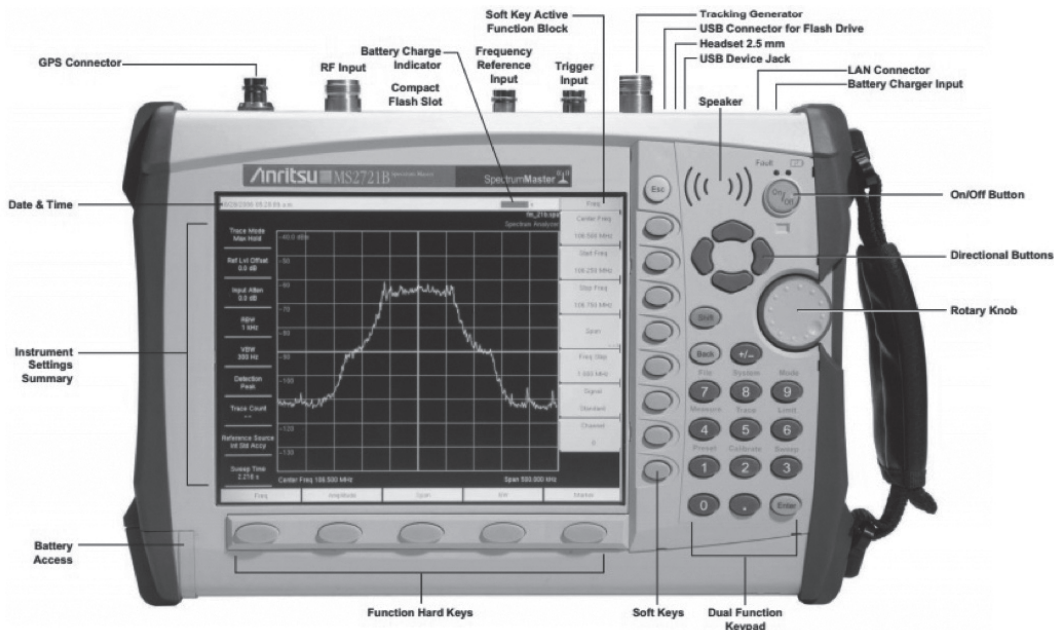


Figura 2.
Analizador de espectro Anritsu MS2721B
 Fuente: Anritsu, 2009

Marco teórico

Arreglo de antenas

Es una antena compuesta por una cantidad de elementos radiadores ordenados de cierta manera para obtener un patrón de radiación predefinido.

Despreciando pérdidas por acoplamiento, el campo de radiación total del arreglo es la suma vectorial de los campos de los elementos radiadores.

En un arreglo de antenas es necesario tener en cuenta cinco características con el fin de modelar exitosamente el patrón de radiación:

- Tipo de configuración: geométrica, lineal, circular o plana
- Distancia de separación entre los elementos
- Amplitud de excitación de cada elemento
- Fase de excitación de cada elemento
- Patrón relativo de cada elemento

Cada uno de estos parámetros modifica las características de radiación. Considerando un arreglo de antenas lineal de dos elementos dipolo como el de la Figura 3 y su respectivo campo en la Ecuación 1.

En donde β = diferencia de fase.

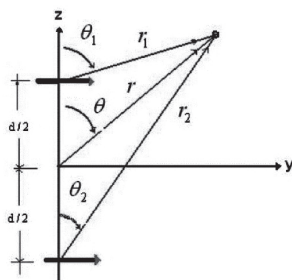


Figura 3.
Dipolo infinitesimal
Fuente: Instituto Politécnico Nacional, 2016

$$E_1 = E_1 + E_2 = \hat{a}_\theta i \eta \frac{k I_0 l}{4\pi r} \left\{ \frac{e^{-i[kr_1 - (\frac{\beta}{2})]}}{r_1} |\cos(\theta_1)| + \frac{e^{-i[kr_2 + (\frac{\beta}{2})]}}{r_2} |\cos(\theta_2)| \right\} \quad (1)$$

Considerando el campo lejano como se muestra en la Figura 4, la magnitud de alimentación de los elementos radiadores es la misma.

Con base en la Figura 4 se tiene lo siguiente:

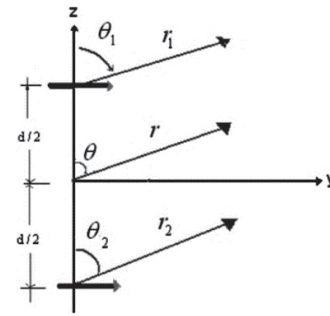


Figura 4.
Observación de un campo lejano
Fuente: Instituto Politécnico Nacional, 2016

Se observa que el ángulo es el mismo, y por lo tanto las distancias de sus vectores r también.

$$\theta_1 \cong \theta_2 \cong \theta \quad (2)$$

$$\frac{r_1 \cong r - \frac{d}{2} \cos(\theta)}{r_2 \cong r + \frac{d}{2} \cos(\theta)} \quad \text{para variaciones en fase (3)}$$

$$r_1 \cong r_2 \cong r \quad \text{para variaciones en amplitud (4)}$$

Sustituyendo en la Ecuación 1 se tiene:

$$E_1 = \hat{a}_\theta i \eta \frac{k I_0 l e^{-ikr}}{4\pi r} |\cos(\theta)| \{ e^{+i(kd \cos \theta + \beta)/2} + e^{-i(kd \cos \theta + \beta)/2} \} \quad (5)$$

Finalmente:

$$E_1 = \hat{a}_\theta i \eta \frac{k I_0 l e^{-ikr}}{4\pi r} |\cos(\theta)| 2 \cos \left[\frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right] \quad (6)$$

Haciendo una comparación con la Ecuación 6 indica que el campo total de un arreglo es igual al campo del elemento de origen multiplicado por un factor conocido como factor de arreglo.

$$FA = 2 \cos \left[\frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right] e^{-i\alpha/2} \quad (7)$$

$$FA_n = 2 \cos \left[\frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right] \quad (8)$$

Carta de Smith

La carta de Smith es una representación gráfica, en el plano del coeficiente de reflexión, de la resistencia y la reactancia normalizada. Esta herramienta permite solucionar problemas de adaptación de impedancias, que en este caso se presentan en el acople de antenas y la suma de estas; con este método se evitan las operaciones complejas que suelen implicar estos cálculos. Sobre el eje horizontal de la carta de Smith se encuentran las resistencias o las conductancias; en el centro se encuentra el valor 1, el cual, hacia la izquierda llega a 0, y hacia la derecha, va aumentando, como se muestra en la Figura 5.

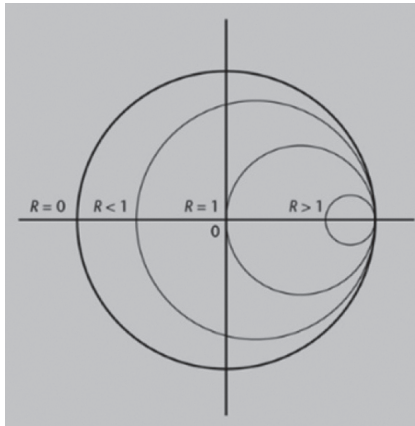


Figura 5.
 Carta de Smith, valores de resistencia o conductancia
 Fuente: Aleixandre, Muñoz, Atienza y Navarro, 2012

La parte reactiva de la impedancia se busca sobre los semicírculos que van desde el extremo derecho hasta algún punto del círculo extremo; si es positivo, va a la parte superior, y, si es negativo, hacia la inferior, como se muestra en la Figura 6.

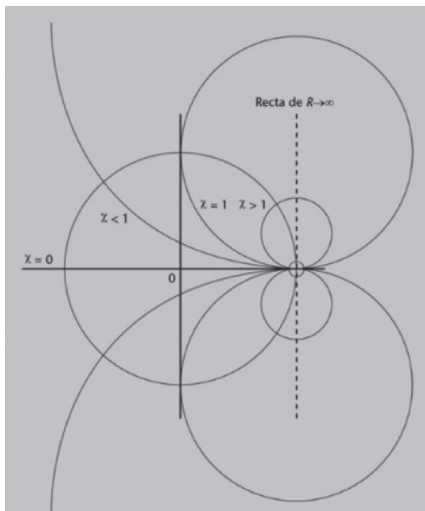


Figura 6.
 Carta de Smith, valores de reactancia
 Fuente: Aleixandre, Muñoz, Atienza y Navarro, 2012

Para ubicar en la carta de Smith el valor de la impedancia de la línea o elemento a analizar se debe normalizar, para ubicarlo se debe tener en cuenta la reactancia y la resistencia y poner sus valores en los círculos que se indicaron anteriormente. Ver la Figura 7

Si se extiende la línea hasta el círculo externo de la carta se debe ubicar el ángulo de fase, la magnitud es la distancia desde el centro de la carta hasta el punto ubicado anteriormente. Ver la Figura 8.

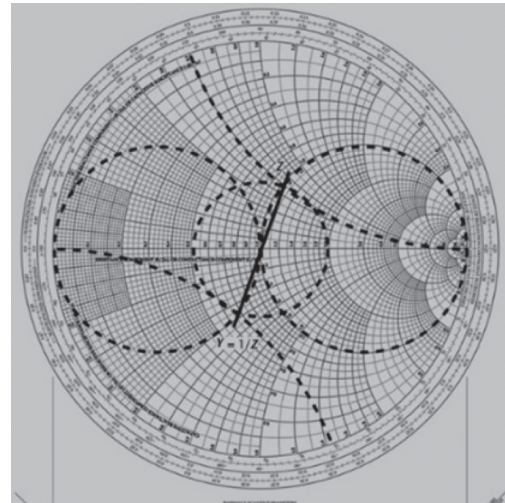


Figura 7.
 Ubicación en la carta de Smith de la impedancia de la línea
 Fuente: Aleixandre, Muñoz, Atienza y Navarro, 2012

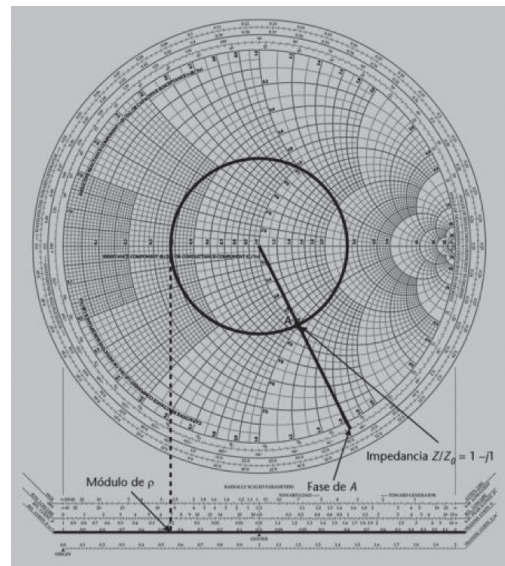


Figura 8.
 Ubicación de fase y magnitud del elemento
 Fuente: Aleixandre, Muñoz, Atienza y Navarro, 2012

Para realizar un desfase de la línea se debe correr el valor del ángulo; para ello se debe tener en cuenta que se puede realizar el movimiento hacia el generador o hacia la carga. Ver la Figura 9.

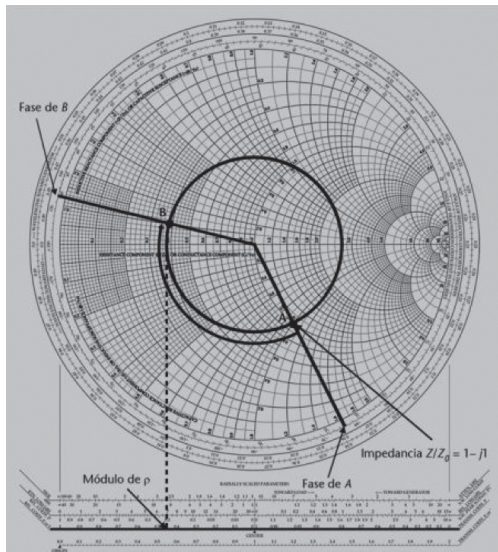


Figura 9.
Deseñe de la línea
Fuente: Aleixandre, Muñoz, Atienza y Navarro, 2012

Matriz de Butler

La matriz de Butler es un dispositivo usado para diseñar amplificadores multipuerto, y especialmente, antenas inteligentes con haces de radiación conmutables.

Una matriz de Butler se realiza usando híbridos de 3dB, cruzadores y desfasadores. Su ancho de banda y sus pérdidas vendrán determinados por el diseño de estos elementos.

Un acoplador es un dispositivo pasivo comúnmente de cuatro puertos, cuyo funcionamiento se basa en dividir la potencia de la señal insertada en un puerto entre sus salidas, de forma simétrica o asimétrica, dependiendo de las características del acoplador.

En el interior de la matriz de Butler es necesario cruzar físicamente dos señales sin que se afecten sus propiedades electromagnéticas y se mantenga un alto aislamiento. Para realizar esta tarea se usa un cruzador.

Las propiedades básicas de una matriz de Butler son: el aislamiento entre cada una de sus entradas, la linealidad en fase con respecto a la posición de salida y el incremento de fase dependiendo de la entrada seleccionada.

Matemáticamente, la matriz de Butler realiza una transformada rápida de Fourier, generando lóbulos que son ortogonales entre sí. La disposición espacial que tendrán los lóbulos depende de las características con las que se diseñen los elementos que conforman la matriz (Danilo, 2016).

Se descartó el uso de la matriz de Butler debido a su complejidad, ya que uno de los objetivos requeridos es que sea un sistema funcional, de fácil acceso al público y de fácil comprensión. Adicionalmente, su sistema se implementa sobre un circuito impreso y con antenas de microcinta.

Estructura

- Materiales 1 tubo PVC de 1/2" de 1 metro
- 2 tubos PVC de 1/2" de 2 metros
- 5 uniones en T de PVC de 1/2"
- 4 uniones en T de PVC de 3/8"
- 1 base de silla giratoria
- 8 tubos de aluminio de 3/8" de 24,1925 cm.
- 5 conectores SMA macho para cable coaxial
- 6 metros de cable coaxial
- 1 sumador channel plus 2534
- 4 tubos de aluminio o de madera de 20 cm



Figura 10.
Materiales
Fuente: Autores

Dipolo

En cada extremo de la T de 3/8" se deben introducir las varillas correspondientes –de 24,1925 cm–, estas no deben unirse y deben fijarse a cada extremo con un tornillo que atraviese la T por completo; de igual manera, por el centro de la T se debe introducir el cable coaxial y conectarse a los tornillos ubicados en cada extremo; es importante tener en cuenta que el cable coaxial tiene un alambre en el centro y un recubrimiento de aluminio alrededor que deben conectarse a los extremos indicados anteriormente. Para conocer la medida del cable se debe tener en cuenta el punto 3 del procedimiento descrito más adelante; es recomendable, además, que se fije en el centro con silicona (esto con el fin de evitar el contacto); al final del cable coaxial se debe introducir el

conector SMA macho. Adicionalmente, se debe colocar un soporte, que puede ser un tubo de aluminio o una vara de madera (cuya longitud puede ser de 20 cm) para acoplar los dipolos en la estructura base (ver figura 11).

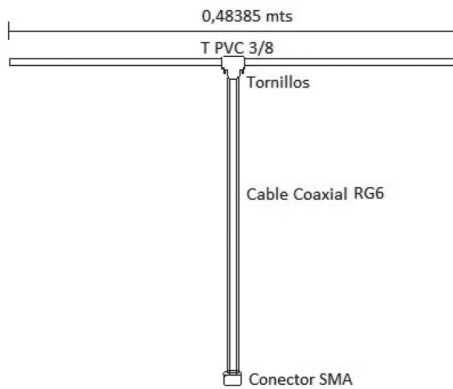


Figura 11.
Construcción del dipolo
Fuente: Autores

Base

El tubo de PVC se debe conectar a la silla giratoria, en cuyo centro se pone una hoja de papel que tiene impreso un círculo indicando los grados respectivos (0° a 360°); en el extremo superior se debe introducir una T de $\frac{1}{2}$ " y en cada extremo de esta, un tubo de PVC de un metro; sobre cada uno de estos tubos hay que insertar dos T de $\frac{1}{2}$ " para poder acoplar cada uno de los dipolos (ver Figura 12).

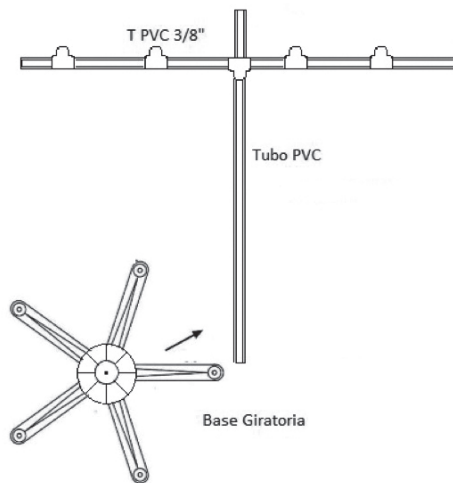


Figura 12.
Construcción base de arreglo
Fuente: Autores

Conexión final

Para realizar la medición del arreglo se deben colocar los dipolos correspondientes en una de las cuatro T de PVC ubicadas en la estructura base; el conector SMA de cada uno de los dipolos debe conectarse al sumador 2534 y la salida de este debe conectarse al VNA (ver Figura 13).

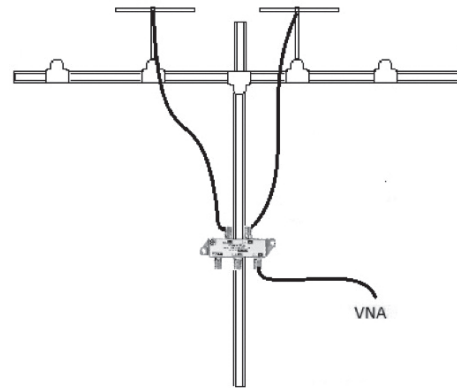


Figura 13.
Conexión final del arreglo
Fuente: Autores

Procedimiento

El proceso para realizar un arreglo de antenas lineal es el siguiente:

1. Según el análisis teórico de un arreglo lineal de antenas que se realizó previamente, se decidió realizar cinco dipolos $\lambda/2$ a una frecuencia de 310MHz (ver Figura 14).

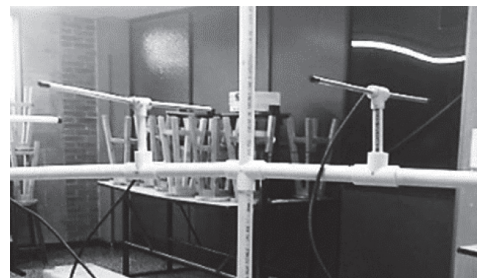


Figura 14.
Dipolos $\lambda/2$ sobre estructura
Fuente: Autores

2. Con el fin de saber cuál es su impedancia y así ubicarlas en la carta de Smith, se mide cada una de las antenas en el VNA previamente calibrado.

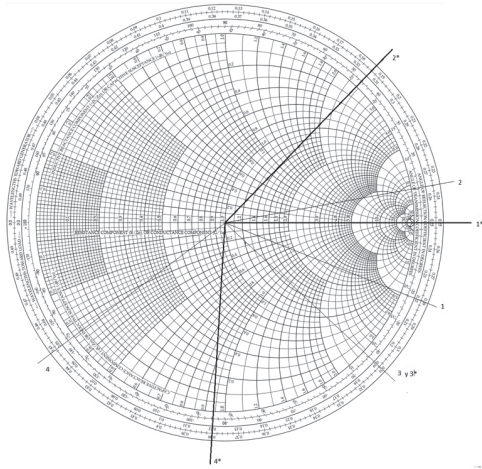


Figura 15.
Ubicación de impedancias de antenas y su desfase en la carta de Smith
Fuente: Autores

3. Después de obtener las impedancias se debe desfazar a 45°, por lo cual se movió hacia el generador la impedancia; para hacerlo se cortó la línea de transmisión. Para saber cuánto se debe cortar, la parte exterior de la carta de Smith indica a cuantas lambdas está la impedancia del generador. En la Figura 15 se observa que las líneas negras oscuras son las líneas ubicadas ya desfasadas, y la línea de referencia es la 3. Luego, se hace la conversión de lambdas a centímetros con el fin de realizar el corte del cable; para ello se debe tener en cuenta la Ecuación 9.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{310 \cdot 10^6} = 0.9677m \quad (9)$$

4. Después de que el elemento se encuentra desfasado y cada uno es ubicado, se suman los dipolos; para ello se utilizó un sumador Channel plus 2534 como el que se observa en la Figura 16.

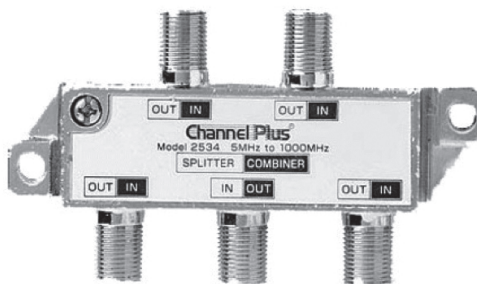


Figura 16.
Sumador channel plus 2534
Fuente: Solid Signal, Signal Group LLC & Affiliates, 2002

- 1 GHz bandwidth
- 9 dB insertion loss

5. Después, se usa el analizador de espectro (previamente

calibrado) para verificar la potencia en cada punto. En la base de la estructura hay un marcador de 360°, que es la guía para girar la estructura cada 5°. Con el fin de construir la gráfica de patrón de radiación –que se observa en la Figura 17– se debe tomar cada potencia y ángulo como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3
Muestra de recopilación de datos

Ángulo	Potencia
0	0,014663484
5	0,010544153
10	0,010057279
15	0,008221957
20	0,030176611
25	0,051615752
30	0,106078759
35	0,149193317
40	0,250596659
45	0,319809069

Fuente: Autores

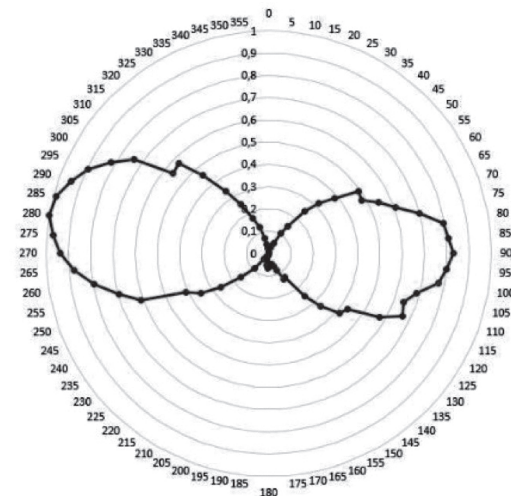


Figura 17.
Patrón de radiación resultante
Fuente: Autores

Se da crédito a los estudiantes de la Universidad Distrital, quienes diseñaron la estructura donde se ubicaron las antenas para realizar el laboratorio, permitiendo así medir el patrón de radiación.

Diagrama de conexión

Este diagrama muestra la conexión mencionada en el procedimiento descrito en el índice anterior (ver Figura 18).

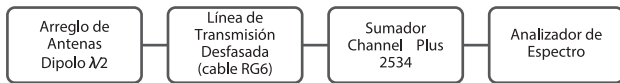


Figura 18.
Diagrama de conexión del arreglo lineal de antenas dipolo $\lambda/2$
Fuente: Autores

Análisis matemático

Desfase de línea de transmisión. Según el punto 2 del procedimiento, se debe medir la impedancia de cada una de las antenas, las cuales arrojaron los siguientes resultados:

Tabla 4
Impedancias de las antenas

Ángulo	Impedancia Z
Antena 1	122,8 - 27,64i
Antena 2	145,02 + 21,04i
Antena 3	91,86 - 20,37i
Antena 4	36,12 - 20,81i

Fuente: Autores

Primero se debe normalizar respecto a la impedancia característica de la línea de transmisión. Se sabe que la impedancia característica de la línea es 75Ω ya que los cables son de calibre RG6 y tienen una impedancia de 75Ω , como también las entradas de los elementos como el sumador.

Para normalizar se aplica la Ecuación 10.

$$|Z| = \frac{z}{z_0} \quad (10)$$

Normalizando, el resultado de las impedancias es el siguiente (ver Tabla 5):

Tabla 5
Impedancias normalizadas

Ángulo	Impedancia Z
Antena 1	1,63733-0,368533i
Antena 2	1,9336+0,280533i
Antena 3	1,2248-0,2716i
Antena 4	0,4816-0,277467i

Fuente: Autores

Para realizar el desfase es necesario hallar el coeficiente de reflexión, el cual es el parámetro que indica qué porcentaje (o porción) de la onda incidente no es consumida o utilizada por la carga y es devuelta a la

fente en forma de onda regresiva; para hallarla se utiliza la Ecuación 11:

$$\rho = \frac{|Z|-1}{|Z|+1} \quad (11)$$

Los coeficientes de reflexión de las antenas son los siguientes (ver Tabla 6):

Tabla 6
Coeficientes de reflexión

Antena	Coeficiente de reflexión ρ	Coeficiente de reflexión ρ
Antena 1	0,256182-0,10393i	0,276465+22,0835 o 0,276465i337,9165
Antena 2	0,324422+0,064604i	0,330792i11,2623
Antena 3	0,114243-0,10813i	0,157302i-43,4257 o 0,157302i316,5743
Antena 4	-0,304153-0,2442i	0,390077i-141,235 o 0,390077i218,765

Fuente: Autores

El objetivo es lograr desfase a la antena con respecto a la inmediatamente siguiente en 45° , para esto se deben analizar los cuatro ángulos (ver Tabla 7) y así correr la línea lo menor posible con el fin de no acortar en exceso la longitud del cable. Es recomendable, además, verificar el valor de la distancia entre las antenas.

Tabla 7
Ángulo de distancia / Diferencia entre antenas

Antenas	Ángulo de distancia / Diferencia entre antenas
1 y 2	326.654°
2 y 3	305.312°
3 y 4	97,8093°
4 y 1	119.152°
1 y 3	21.3422°
2 y 4	207.503°

Fuente: Autores

Con los resultados obtenidos anteriormente, se debe escoger una antena que sea referencia con respecto a las demás para realizar los desfases; es recomendable graficarlas para así encontrar una solución óptima que satisfaga el desarrollo del desfase.

Como se puede observar en la Figura 15, se deduce la siguiente solución:

Se debe correr la fase en dirección hacia la carga, la antena 4 corre hacia la antena 3, la antena 1 corre hacia la antena 2, esto para obtener un desfase de 45° entre la antena 3 y la antena 1; y por último, la antena 2 con

respecto a la antena 3 debe tener 90° de desfase, con esto se debe cumplir el requerimiento de que estén a 45° con respecto a la inmediatamente siguiente.

Desfase antena 4

$$\phi_4 = \phi_3 - 45^\circ = 316,5743^\circ - 45^\circ = 271,5743 \quad (12)$$

El nuevo ángulo de la antena 4 es $\phi_4 = 271,5743^\circ$

Desfase antena 1

$$\phi_1 = \phi_3 + 45^\circ = 316,5743^\circ + 45^\circ = 361,5743 \quad (13)$$

Como ya se dio una vuelta de 360°, se resta esta para verificar el ángulo real desde el plano 0 o inicial.

El nuevo ángulo de la antena 1 es $\phi_1 = 1,5743^\circ$

Desfase antena 2

$$\phi_2 = \phi_3 + 90^\circ = 316,5743^\circ + 90^\circ = 406,5743 \quad (14)$$

Como ya se dio una vuelta de 360° se resta esta para verificar el ángulo real desde el plano 0 o inicial.

El nuevo ángulo de la antena 2 es $\phi_2 = 46,5743^\circ$

Los valores del coeficiente de reflexión con desfase a 45° se muestran en la Tabla 8:

Tabla 8
Valores del coeficiente de reflexión con desfase a 45°

Antenas	Coefficiente de reflexión ρ
1	0,276465i1,5743°
2	0,330792i46,5743
3	0,157302i-43,4257
4	0,390077i-88,4257

Fuente: Autores

El corrimiento de las líneas de transmisión se puede verificar en la carta de Smith. Ahora se debe hallar las nuevas impedancias normalizadas $|Z|$ con la Ecuación 15 (ver Tabla 9).

$$|Z| = \frac{-1-\rho}{\rho-1} \quad (15)$$

Con el fin de conocer la distancia final del cable coaxial para obtener el desfase requerido, se debe realizar la conversión de lambdas al sistema métrico decimal (centímetros o metros). Para ello se debe tener en cuenta la Ecuación 9.

Tabla 9
Impedancias después de análisis de desfase 45°

Antena	Nuevas impedancia $ Z $
Antena 1	1.7635+0.029006i
Antena 2	1.3604+0.7339i
Antena 3	1,2248-0,2716i
Antena 4	0.749819-0.689698i

Fuente: los autores

En la carta de Smith hay una sección que está en la parte exterior de la circunferencia, como se había mencionado anteriormente, esto indica una métrica hacia el generador y hacia la carga en una escala de 0.1. En la Figura 19 se puede ver la representación de la impedancia original y la que contiene el desfase; extendiendo la línea se observa que esta se cruza con un valor en la parte exterior de la circunferencia.

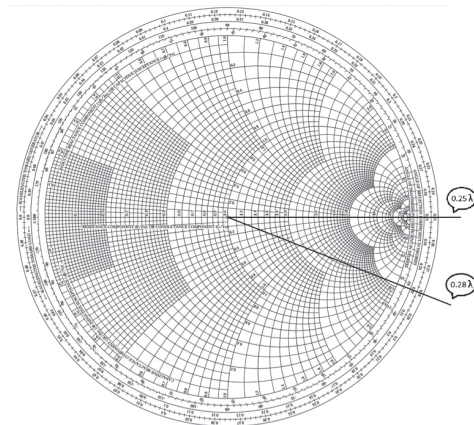


Figura 19.
Representación de la antena 1 métrica de lambda
Fuente: Autores

A continuación, se restan dichos valores y este resultado se convierte de lambda a centímetros o metros mediante regla de tres.

$$(0.28-0.25)\lambda = 0.029\lambda \quad (16)$$

$$\frac{0.029\lambda \cdot 0.9677m}{\lambda} = 0.02806m = 2.8 \text{ cm} \quad (17)$$

Teniendo en cuenta que la medida del cable es de aproximadamente un metro, a la antena 1 se deben cortar 2.8 cm para obtener dicho desfase en la línea; este mismo proceso se realiza con la antena 2. Como la antena 3 fue la base para realizar el desfase no tiene ningún cambio. Por último—como se observa en la Figura 15—, la antena 4 tiene que realizar un giro completo y se tendría

que hacer un corte muy grande al cable si este fuera de un metro, por lo cual este se cortó más largo y se tomó hacia la carga; sin embargo, se realiza el mismo proceso anterior teniendo en cuenta que el valor obtenido es la adición de cable.

Teniendo en cuenta que la medida del cable es de aproximadamente un metro, a la antena 1 se deben cortar 2.8 cm para obtener dicho desfase en la línea; este mismo proceso se realiza con la antena 2. Como la antena 3 fue la base para realizar el desfase no tiene ningún cambio. Por último—como se observa en la Figura 15—, la antena 4 tiene que realizar un giro completo y se tendría que hacer un corte muy grande al cable si este fuera de un metro, por lo cual este se cortó más largo y se tomó hacia la carga; sin embargo, se realiza el mismo proceso anterior teniendo en cuenta que el valor obtenido es la adición de cable.

$$(0.444-0.374)\lambda = 0.07\lambda \quad (18)$$

$$\frac{0.07\lambda * 0.9677m}{\lambda} = 0.0677396 m = 6,7 cm \quad (19)$$

Patrón de radiación. Se debe tener en cuenta que durante el proyecto se realizaron varias medidas con los dipolos lambda medios a distancias de lambda medios, lambda tercios y lambda, con ángulos de desfase de 45°, 90° y 135° aproximadamente.

Se sabe que la potencia de un dipolo lambda medios es:

$$P_{tx} = \left(\frac{\cos\left(\frac{\beta * L}{2} * \cos(\theta)\right) - \cos\left(\frac{\beta * L}{2}\right)}{\sin(\theta)} \right)^2 \quad (20)$$

Y el factor de arreglo es:

$$FA = \left(\cos\left(\frac{1}{2} (\beta * d * \cos(\theta)) + \alpha\right) \right)^2 \quad (21)$$

La potencia total de un arreglo de dos antenas es igual:

$$P_{total \text{ arreglo}} = P_{tx} * FA \quad (22)$$

Este procedimiento indica que se debe hacer un barrido y tomar valores cada 5° grados; de manera teórica, tomando como ejemplo un ángulo de barrido de 45° de un dipolo lambda medios a una distancia de lambda medios y un desfase entre dipolos de 45°, esto se calcularía de la siguiente manera. Cabe resaltar que es mejor realizar dichos cálculos en un programa matemático como Matlab o Microsoft Excel (ya que es necesario realizar un barrido o listado de ángulos), por lo cual se debe hacer el cambio de grados a radianes.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 * 10^8}{310 * 10^6} = 0,967741 cm \quad (23)$$

$$\beta = \frac{2 * \pi}{\lambda} = 6,4926 \quad (24)$$

$$\text{Distancia entre los elementos } d = \frac{\lambda}{2} = 0,48387097 \quad (25)$$

Ángulo de desfase entre los elementos

$$\alpha = \frac{45 * \pi}{180} = 0,785398 \quad (26)$$

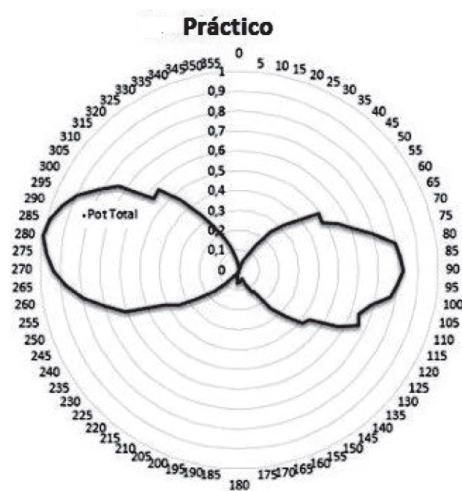
$$\text{Ángulo de barrido } \theta = \frac{45 * \pi}{180} = 0,785398 \quad (27)$$

$$P_{tx} = \left(\frac{\cos(1,570796 * \cos(0,785398)) - \cos(1,570796)}{\sin(0,785398)} \right)^2 = 0,394300133 \quad (28)$$

$$FA = \left(\cos\left(\frac{1}{2} (6,4926 * 0,48387097 * \cos(0,785398)) + 0,785398\right) \right)^2 = 0,00178726 \quad (29)$$

$$P_{total \text{ arreglo}} = 0,394300133 * 0,004532729 = 0,00178726 \quad (30)$$

Después de hacer dichos cálculos con cada uno de los ángulos correspondientes desde 0° a 360°, se puede realizar una gráfica para verificar su respectivo patrón de radiación, como se muestra en la Figura 20.



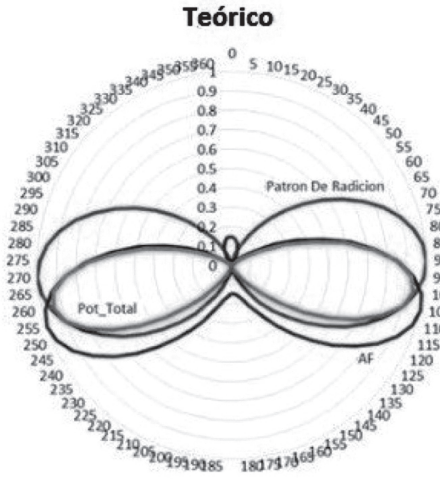


Figura 20.
 Resultados teóricos/prácticos arreglo de dos dipolos $\lambda/2$, distancia $\lambda/2$ desfase 45°
 Fuente: Autores

Los resultados obtenidos pueden ser comparados con el programa Amanogawa, el cual brinda una visión del resultado del patrón de radiación resultante; sin embargo, se debe tener en cuenta que este brinda la información del factor de arreglo y la del campo por separado (ver Figura 21).

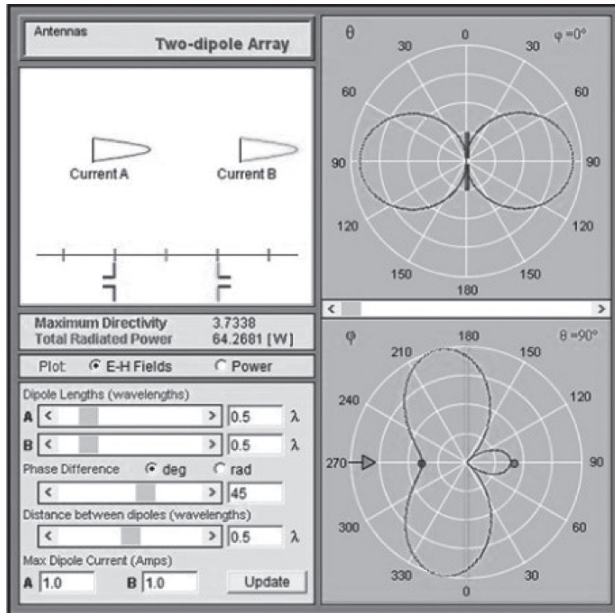


Figura 21.
 Resultados Amanogawa arreglo 2 Antenas dipolo $\lambda/2$, distancia $\lambda/2$, desfase 45° .
 Fuente: SEMCHIP Semchip (s. f.)

También se realizó la simulación de los datos teóricos en 3D en el programa Matcad, con el fin de tener una perspectiva diferente del patrón de radiación de cada elemento y del arreglo (ver Figuras 22-30).

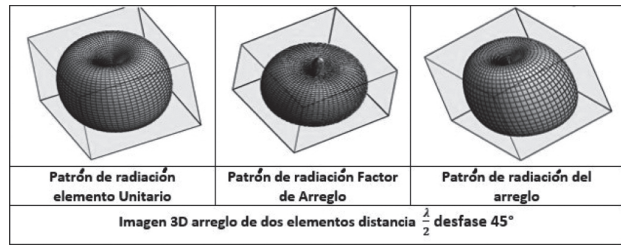


Figura 22.
 Simulación 3D Matcad. Arreglo 2 antenas dipolo $\lambda/2$, distancia $\lambda/2$, desfase 45°
 Fuente: Autores

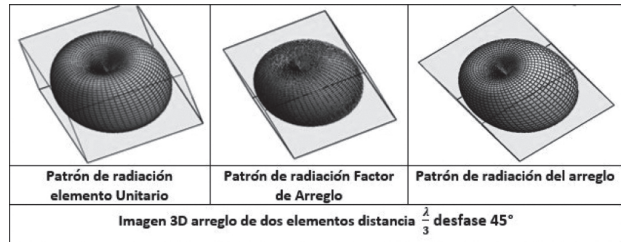


Figura 23.
 Simulación 3D Matcad. Arreglo 2 antenas dipolo $\lambda/2$, distancia $\lambda/3$, desfase 45°
 Fuente: Autores

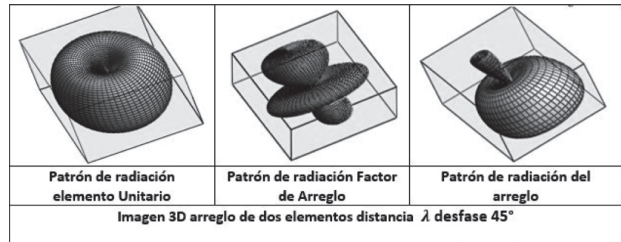


Figura 24.
 Simulación 3D Matcad. Arreglo 2 antenas dipolo $\lambda/2$, distancia λ , desfase 45°
 Fuente: Autores

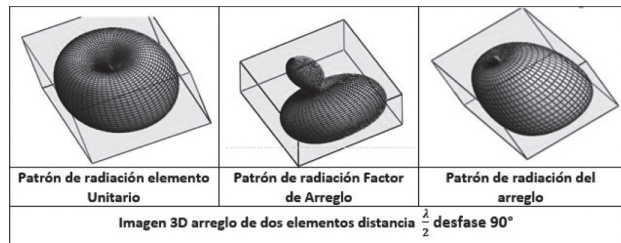


Figura 25.
 Simulación 3D Matcad. Arreglo 2 antenas dipolo $\lambda/2$, distancia $\lambda/2$, desfase 90°
 Fuente: Autores

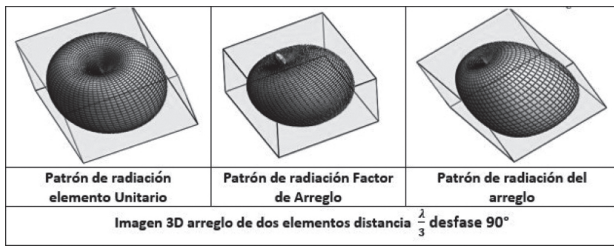


Figura 26.
 Simulación 3D Matcad. Arreglo 2 antenas dipolo $\lambda/2$, distancia $\lambda/3$, desfase 90°
 Fuente: Autores

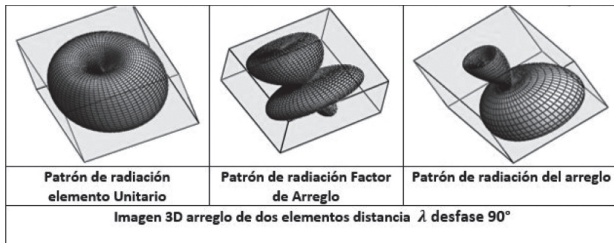


Figura 27.
 Simulación 3D Matcad. Arreglo 2 antenas dipolo $\lambda/2$, distancia λ , desfase 90°
 Fuente: Autores

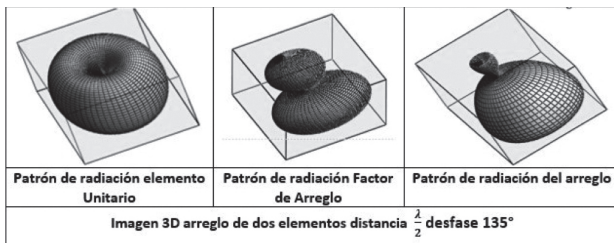


Figura 28.
 Simulación 3D Matcad. Arreglo 2 antenas dipolo $\lambda/2$, distancia $\lambda/2$, desfase 135°
 Fuente: Autores

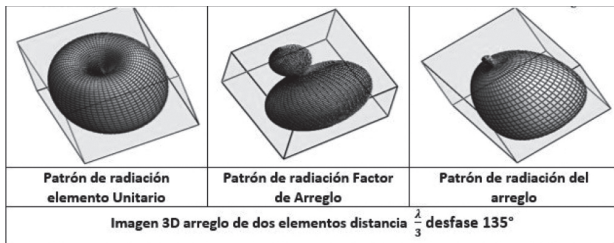


Figura 29.
 Simulación 3D Matcad. Arreglo 2 antenas dipolo $\lambda/2$, distancia $\lambda/3$, desfase 135° .
 Fuente: Autores

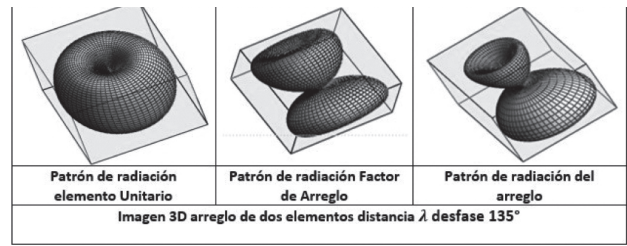
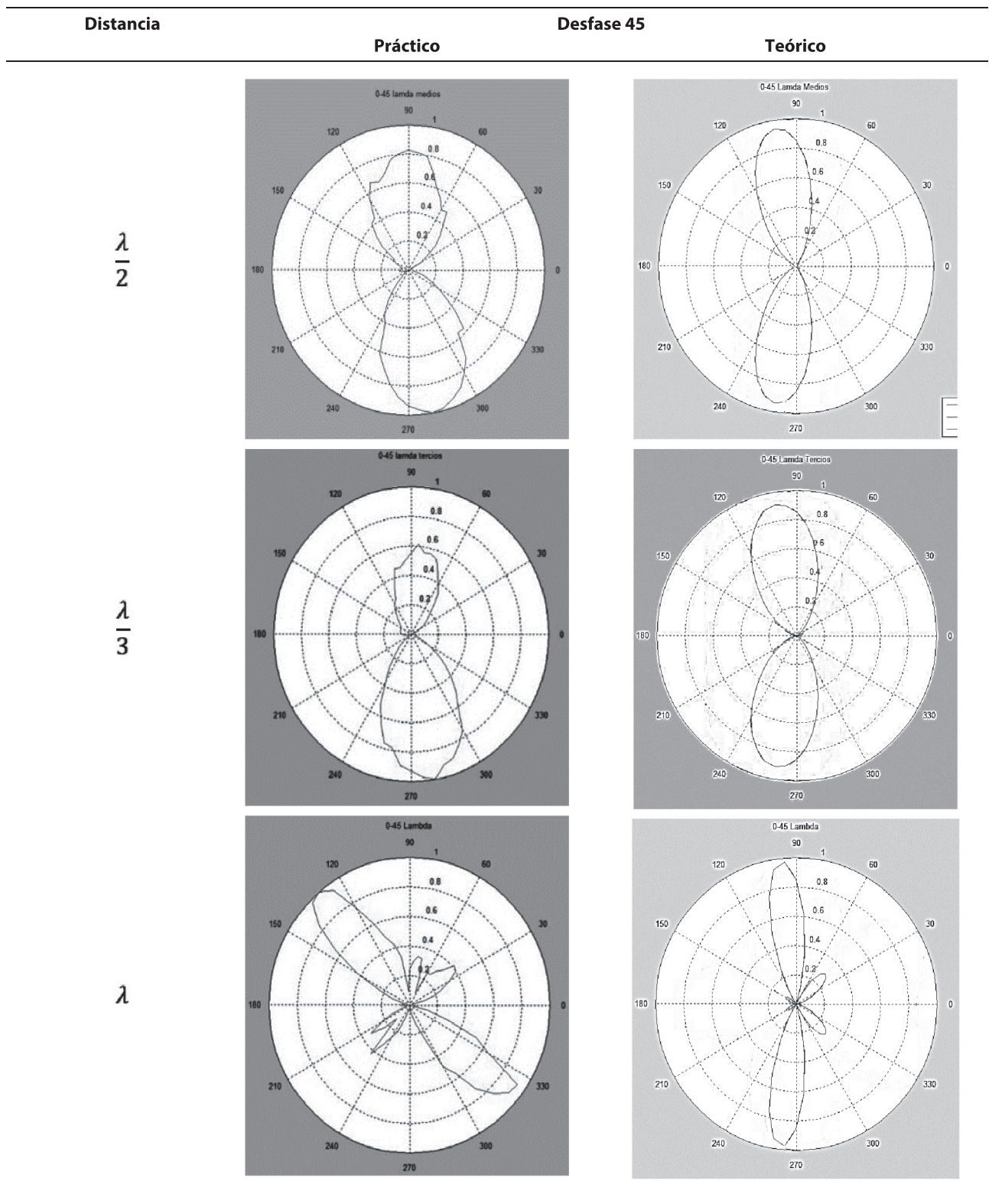


Figura 30.
 Simulación 3D Matcad. Arreglo 2 antenas dipolo $\lambda/2$, distancia λ , desfase 135°
 Fuente: Autores

Resultados

A continuación, en las Tablas 10, 11 y 12, se muestran las gráficas de los resultados obtenidos con las fórmulas teóricas empleadas teniendo en cuenta su desfase, la distancia y la cantidad de elementos (columna derecha); también se observan las gráficas de los resultados obtenidos de las mediciones realizadas en el analizador de espectro (columna izquierda). En estas gráficas es posible observar que los datos teóricos y prácticos son aproximados, esto teniendo en cuenta que el entorno en el cual se ejecutó el arreglo presentaba ruido y no se encontraba aislada de ondas electromagnéticas o acústicas, como ocurriría en una cámara anecoica. En las gráficas teóricas se incluyó el campo de un solo elemento dipolo y el factor de arreglo para poder observar y diferenciar el resultado de su multiplicación, el cual es el campo resultante del arreglo.

Tabla 10
Resultados teóricos y prácticos del desfase de 45°



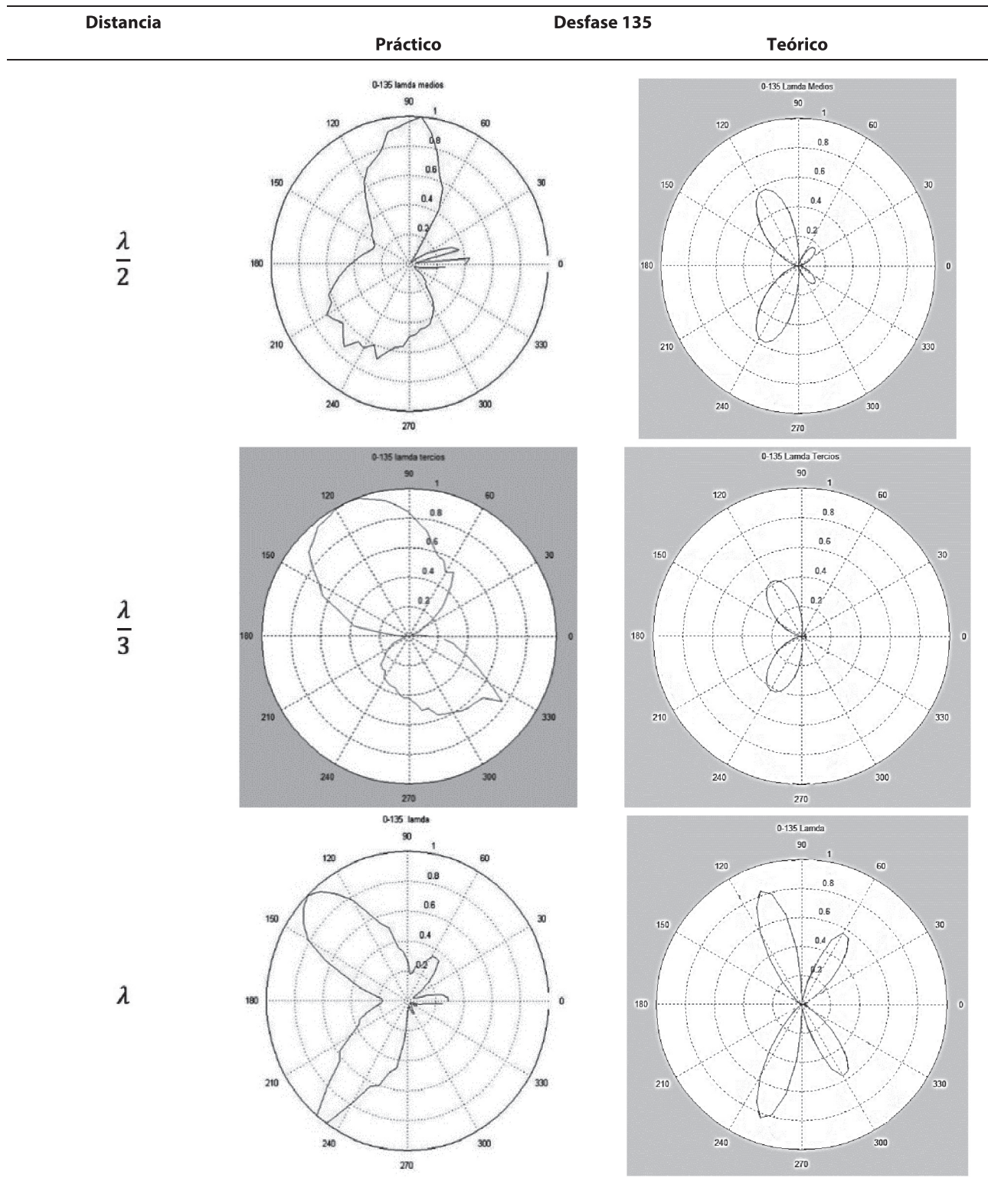
Fuente: Autores

Tabla 11
Resultados teóricos y prácticos del desfase de 90°

Distancia	Práctico	Desfase 90	Teórico
$\frac{\lambda}{2}$			
$\frac{\lambda}{3}$			
λ			

Fuente: Autores

Tabla 12
Resultados teóricos y prácticos del desfase de 135



Fuente: Los autores

Conclusiones

Durante el desarrollo del proyecto se pudo concluir que el arreglo realizado tuvo éxito, ya que, según las tablas de resultados, los patrones obtenidos son muy aproximados a los teóricos y se cumple el objetivo principal, el cual consistía en demostrar que se podía modelar y verificar el patrón de radiación variando características como distancia y fase. El arreglo puede ser empleado por el público en general y ser construido con materiales de fácil acceso.

Se observa que, para obtener unos resultados más ajustados a los teóricos, se debe tener en cuenta la exactitud del desfase entre las antenas; como este se realizó mediante un método gráfico, su exactitud no fue la ideal y esto afectó el patrón de radiación resultante. Uno de los elementos que influyó directamente en los resultados fue el generador de señales que trabaja a una intensidad de señal de solo 7 dBm y al tener una pérdida por acoplamiento en el receptor de más de 9 dBm, sin contar con las pérdidas de espacio libre, el resultado varió con respecto al teórico.

Otro factor que afecta el desfase de los radiadores en un arreglo de antenas es la distancia entre el emisor y los receptores, ya que el arreglo se debe encontrar en el campo lejano de radiación de la antena transmisora para asegurar que el campo recibido sea lo más aproximado posible a una onda plana y el arreglo reciba la radiación de la onda prácticamente al mismo tiempo, esto con el objetivo de que el desfase en el arreglo sea lo más aproximado al teórico posible. Al tener una radiación a una potencia tan pequeña, la distancia a la cual se pudieron ubicar los receptores no fue la adecuada, ya que en el campo lejano la recepción era muy baja y casi nula; por tal motivo fue necesario ubicar el arreglo más cerca de la fuente, por lo cual los desfases no fueron los teóricos, ya que la onda de recepción no era una onda totalmente plana. Entre mayor es la frecuencia es más difícil realizar el desfase mediante el método de carta de Smith, ya que la longitud de onda es más pequeña y el corte que se debe realizar en el cable es también más reducido y compromete su exactitud; por ello es recomendable utilizar las diferentes matrices y componentes como la matriz de Butler.

Referencias

Aleixandre, X., Muñoz, J., Atienza, M. & Navarro, A. (2012). Líneas de transmisión, Física II. (pp. 66-80) Catalunya: Universidad Oberta de Catalunya. Recuperado de https://www.exabyteinformatica.com/uoc/Fisica/Fisica_II_ES/Fisica_II_ES_%28Modulo_6%29.pdf

Amanogawa.com. (2016). SEMCHIP. Recuperado de <http://www.amanogawa.com/>

Anritsu. (2008). VNA Master. Recuperado de <http://dl.cdn-anritsu.com/en-us/test-measurement/files/Brochures-Datasheets-Catalogs/Brochure/11410-00400.pdf>

Anritsu. (2009). Spectrum Master. Recuperado de <https://dl.cdn-anritsu.com/en-us/test-measurement/files/Brochures-Datasheets-Catalogs/Brochure/11410-00412.pdf>

Danilo, A. (2016). Diseño e implementación de una matriz de Butler 4x4. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca.

Instituto Politecnico Nacional. (2016). Sistemas radiantes. Recuperado de http://antenuval.mex.tl/imagesnew2/0/0/0/2/0/5/4/9/3/1/TEMA%203_1.pdf

Semchip. (s.f.). Amanogawa. Recuperado de <http://www.amanogawa.com/index.html>

Solid Signal, Signal Group LLC & Affiliates. (2002). Solid Signal, Signal Group LLC & Affiliates. Recuperado de <http://www.solidsignal.com/pview.asp?p=cp2534>