

# **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**

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE ALIMENTACIÓN DE  
AMPLITUD NO UNIFORME PARA UN ARREGLO DE ANTENAS  
PARA LA REDUCCIÓN DE LÓBULOS SECUNDARIOS**

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

**ROBERTO ALEXIS GUERRERO GONZALON**

**roberto.guerrero@epn.edu.ec**

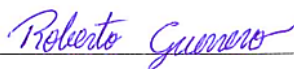
**DIRECTOR: HERNÁN VINICIO BARBA MOLINA**

**hernan.barba@epn.edu.ec**

**DMQ, octubre 2022**

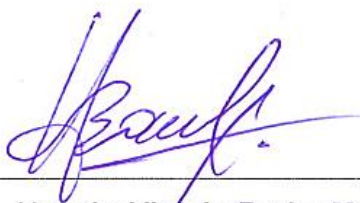
## CERTIFICACIONES

Yo, ROBERTO ALEXIS GUERRERO GONZALON 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.



**Roberto Alexis Guerrero Gonzalon**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por ROBERTO ALEXIS GUERRERO GONZALON, 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.

ROBERTO ALEXIS GUERRERO GONZALON

HERNÁN VINICIO BARBA MOLINA

## DEDICATORIA

La vida está llena de desafíos, obstáculos y dificultades que parecen infranqueables en ocasiones. Y fue aquí en la Escuela Politécnica Nacional donde tuve que enfrentar a muchos de esos retos, los mismos que en ocasiones llegan a cobrarnos factura física y emocionalmente. A lo largo de este camino en la universidad he podido experimentar una pequeña probada de la realidad que nos tiene preparado el mundo una vez crucemos esas puertas, he visto profesionales ser cegados por su arrogancia haciendo menos los esfuerzos de a quienes se supone deben guiar y orientar poniendo trabas cada vez que era posible. Pero también, como si de una moneda se tratara, he experimentado una cara más agradable y la más significativa, donde profesores han sido mi guía y mi apoyo para superar momentos complejos. Han sido amigos, docentes con vocación que aman su trabajo y se esfuerzan día con día en moldear a sus alumnos no solo en profesionales de excelencia sino también en hacer que seamos excelentes personas.

“Tu futuro todavía no ha sido escrito, ni el de ninguno. Tu futuro es el que tú te formes”

## **AGRADECIMIENTO**

Me faltaría espacio para agradecer a todos por quienes he llegado a hasta aquí, sin embargo, no puedo dejar de darles las gracias a las siguientes personas:

A mi madre, por haberme dado la oportunidad de formarme en esta gran institución por haberme dado apoyo durante todo este largo camino.

A mi padre, que a la distancia me ha apoyado para que pueda cumplir mis metas.

A mis tíos por ser mi guía y ejemplo de superación, enseñándome que siempre se puede ser mejor y que la calma puede hacerte prevalecer ante cualquier dificultad.

A mis abuelitas por ser dosis perfecta entre ternura y disciplina para que sea un hombre con valores.

A Verónica que a estado para mí en las buenas y en las malas siendo la voz de la razón cuando todo parecía incierto, impulsándome cada vez a ser la mejor versión.

A mis amigos por hacer más agradable mi tiempo en la universidad.

Por último, quiero agradecer a mi bisabuelo quien, aunque ya no esté en este mundo siempre será el faro que ilumina el camino para que pueda llegar lejos.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
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 DIVISORES DE POTENCIA.....	3
1.4.1.1 DIVISORES DE POTENCIA RESISTIVOS .....	3
1.4.1.2 DIVISORES DE POTENCIA TIPO WILKINSON .....	4
1.4.2 REDES CONFORMADORAS DE HACES.....	5
1.4.2.1 MATRIZ DE BLASS.....	5
1.4.2.2 MATRIZ DE BUTLER .....	6
1.4.3 ATENUADORES .....	7
1.4.3.1 ATENUADOR TIPO T.....	8
1.4.3.2 ATENUADOR TIPO $\Pi$ .....	8
1.4.4 DISTRIBUCIONES MATEMÁTICAS.....	9
1.4.4.1 DISTRIBUCIÓN UNIFORME .....	9
1.4.4.2 DISTRIBUCIÓN TRIANGULAR .....	10
1.4.4.3 DISTRIBUCIÓN BINOMIAL .....	11
2 METODOLOGÍA.....	13
2.1 DISEÑO DE LOS DIVISORES DE POTENCIA TIPO WILKINSON .....	13
2.1.1 DISEÑO DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DEL DIVISOR DE POTENCIA 14	
2.1.2 SIMULACIÓN DEL DIVISOR POTENCIA WILKINSON 1:8 EN ADS.....	14
2.1.3 DISEÑO DE LAS LÍNEAS PARA LOS ATENUADORES.....	18
2.1.4 FINALIZACIÓN DE LA RED DE ALIMENTACIÓN.....	19
2.2 DISEÑO DE LOS ATENUADORES DE POTENCIA.....	21
2.3 FABRICACIÓN DE LOS CIRCUITOS IMPRESOS .....	23
2.3.1 EXPORTACIÓN DE ARCHIVOS PARA FABRICACION .....	23
2.3.2 PERFORACIÓN Y CORTOCIRCUITADO (PUESTA A TIERRA).....	24

2.3.3	SOLDADURA DE ELEMENTOS EN LAS PLACAS .....	25
2.3.4	OBTENCIÓN DE DATOS DE LOS DISEÑOS SIMULADOS Y CONSTRUIDOS .....	29
2.3.4.1	OBTENCIÓN DE PARÁMETROS S EN LA SIMULACION .....	29
2.3.4.2	MEDICIÓN DE PARÁMETROS S EN LOS PROTOTIPOS CONSTRUIDOS.....	31
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	39
3.1	RESULTADOS.....	39
3.2	CONCLUSIONES.....	41
3.3	RECOMENDACIONES .....	42
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	43
	ANEXOS .....	44

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación reseña el diseño, simulación, implementación y posterior análisis de un sistema de alimentación de amplitud no uniforme para el mejoramiento del nivel de lóbulo secundario (SLL – *Side-Lobe Level*) de un arreglo de antenas sobre un sustrato FR4 a una frecuencia de trabajo de 5 GHz.

En el capítulo inicial se describe de manera breve conceptos fundamentales para este proyecto como los divisores de potencia, las redes conformadoras de haces, los atenuadores de potencia y las distribuciones matemáticas las cuales permitirán el mencionado mejoramiento del nivel de lóbulo secundario. Enumerando características y clasificación de cada uno de los conceptos anteriormente mencionados.

En el capítulo dos se describe brevemente en forma clara los puntos más importantes para el diseño, simulación y posterior implementación del sistema de alimentación. El divisor de potencia tipo Wilkinson 1:2 será el punto de partida del presente diseño sin olvidar que éste debe proporcionar una atenuación teórica de  $-3$  dB en sus salidas. Conectadas a estas salidas se acoplan otros divisores de potencia tipo Wilkinson de características similares hasta obtener como resultado un divisor de potencia Wilkinson con una entrada y ocho salidas. Después se presenta el acoplamiento de redes de atenuación con el fin de conformar las potencias requeridas (basadas en las distribuciones matemáticas) en el mejoramiento del SLL. Finalmente presenta el diseño completo de los sistemas de alimentación y la implementación de éstos sobre el sustrato FR4 caracterizado.

En el capítulo tres se encuentran se realizarán las mediciones mismas que se pueden apreciar en tablas donde se calculan los errores con respecto a los valores teóricos. Además de las conclusiones obtenidas del análisis de resultados del capítulo anterior y junto a unas recomendaciones.

**PALABRAS CLAVE:** Divisor de potencia Wilkinson, Keysight® ADS, sustrato FR4, distribución binomial, distribución triangular, atenuador tipo T.



## ABSTRACT

This work reviews the design, simulation, implementation, and subsequent analysis of a non-uniform amplitude power supply system for the improvement of the SLL on an FR4 substrate with a working frequency of 5 GHz.

The initial chapter briefly describes fundamental concepts for this project such as power dividers, beamforming networks, power attenuators and mathematical distributions. Listing characteristics and classification of each of the concepts.

Chapter two briefly describes in a clear way the most important points for the design, simulation and subsequent implementation of the power system, the Wilkinson 1:2 splitter will be the starting point of this design without forgetting that it must provide a theoretical attenuation of  $-3\text{dB}$  and a gap of  $90^\circ$  between the input and the outputs. After these outputs, other wilkinson dividers of similar characteristics are coupled until a 1:8 Wilkinson divider is obtained as a result. Finally, the attenuators must be coupled in the corresponding outputs to have the required powers.

Chapter three presents the complete design of the power systems and their implementation on the characterized FR4 substrate. In addition to the measurements that can be seen in tables where the relative errors with respect to the simulations are calculated.

In chapter four are the conclusions obtained from the analysis of results of the previous chapter and together with some recommendations.

**KEYWORDS:** Wilkinson power divider, Keysight® ADS, FR4 substrate, binomial distribution, triangular distribution, T-type attenuator.

# 1 INTRODUCCIÓN

Uno de los requerimientos más sensibles en el diseño de antenas para diversas aplicaciones radiantes es la disminución de los lóbulos secundarios [1].

Una de las técnicas para conseguir el mejoramiento del nivel de lóbulo secundario – SLL (*Side Lobe Level*) es la utilización de un esquema de alimentación de amplitud no uniforme tal como binomial (aka binómica), Dolph-Tschebyscheff, triangular o edge [1]–[3].

En arreglos lineales uniformemente distribuidos, los lóbulos secundarios y/o los *grating lobes* comienzan a marcar su presencia cuando sus elementos están espaciados una media longitud de onda.

Esto hecho dificulta la síntesis de lóbulos de radiación en estructuras extremadamente grandes (es decir, con espaciamiento entre elementos de más de una media longitud de onda) lo que influye directamente en el desempeño de sistemas en términos de potencia de transmisión [4].

Por otra parte, en un escenario real, es decir, con elementos no isotrópicos, la selección de los radiadores en el arreglo establece un punto de decisión en el desempeño del arreglo relacionado con el acoplamiento (circuital o radiante) que experimenten los elementos [5].

En este proyecto de integración curricular se diseñará e implementaran dos redes de alimentación no uniforme para 5 elementos: una triangular y otra binomial, mediante el uso de tecnología *microstrip* a una frecuencia de 5 GHz.

Primeramente, se describirá de forma breve el funcionamiento de los divisores de potencia, los atenuadores pasivos y circuitos *microstrip*.

Posteriormente se realizará el diseño y simulación de los circuitos que se analizarán. Una vez que se haya comprobado que el diseño cumpla con las condiciones requeridas se procederá con la fabricación de los circuitos y se recolectará todos los datos necesarios para finalmente redactar las conclusiones pertinentes en base a lo observado durante el proyecto.

## 1.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar una red de alimentación de amplitud no uniforme para un arreglo de antenas para la reducción de lóbulos secundarios.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar redes de alimentación en tecnología *microstrip* con la menor cantidad de pérdidas de potencia dentro de la misma.
- Diseñar e implementar una red de atenuadores pasivos a fin de conseguir los valores de potencia necesarios de acuerdo a un tipo de distribución matemática.
- Realizar un análisis del desempeño entre una red de alimentación no uniforme binomial y triangular de cinco elementos basado en los parámetros de dispersión.

## 1.3 ALCANCE

En primer lugar, se revisará la teoría relacionada a redes conformadoras de haces en arreglos de antenas lineales con alimentación no uniforme. Se revisarán implementaciones reportadas en la literatura con enfoques similares para comprender de mejor manera el objetivo del presente proyecto.

Seguidamente, se realizará el diseño de dos redes de alimentación sobre un sustrato FR4 en cuyas salidas se obtenga un esquema de alimentación binomial y triangular, respectivamente. Cada red de alimentación contendrá divisores de potencia tipo Wilkinson y atenuadores acorde a los esquemas de alimentación planteados. Cada diseño será modelado, primero, de una manera teórica (*schematic*) y luego, en un *layout* en la herramienta de simulación Keysight® ADS.

Por último, se construirán las redes de alimentación. Se realizarán las medidas de los parámetros  $S$  las cuales serán comparadas con los resultados obtenidos en la simulación.

Los productos esperados en este componente son dos redes de alimentación con salidas, una binomial y otra triangular, para la alimentación de un arreglo lineal de antenas.

## 1.4 MARCO TEÓRICO

En esta sección se describe de manera breve los conceptos relacionados a los divisores de potencia, los tipos de divisores de potencia y las características del divisor de potencia Wilkinson, redes conformadoras de haces y un ejemplo de ellas dado por la matriz de Butler.

### 1.4.1 DIVISORES DE POTENCIA

Se puede definir como el dispositivo o arreglo que permite fraccionar una señal de entrada entre dos o más salidas. Para conocer el nivel de potencia que se tendrá en las salidas basta con hacer uso de la relación resultante entre las potencias dada por la ecuación (1.1):

$$P_{out} = \frac{P_{in}}{N} \quad (1.1)$$

Donde:

***P<sub>in</sub>***: Potencia de entrada

***P<sub>out</sub>***: Potencia de salida

***N***: Numero de salidas

Se debe considerar que este análisis es válido para un divisor de potencia ideal en el cual todas las potencias de salida serán iguales, en la realidad es necesario considerar otros factores que provocaran pérdidas dentro del sistema. [7]

Una vez que se ha definido brevemente qué son los divisores de potencia se detallarán los tipos de divisores más relevantes.

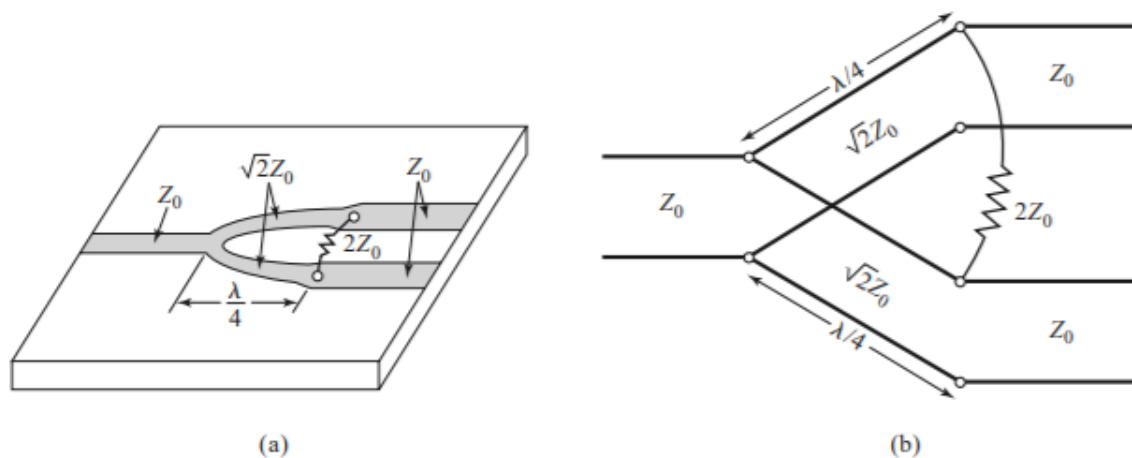
#### 1.4.1.1 DIVISORES DE POTENCIA RESISTIVOS

Los divisores de potencia resistivos son los más conocidos pues solamente están conformados por resistencias. Es importante mencionar que, al ser un sistema exclusivamente resistivo, cuando se diseña el divisor, factores como la frecuencia no son relevantes entonces, su implementación es bastante sencilla pero no se puede garantizar que se tendrá la máxima transferencia de potencia. [7]

### 1.4.1.2 DIVISORES DE POTENCIA TIPO WILKINSON

Los divisores de potencia tipo Wilkinson son de tipo reactivo los cuales se implementan comúnmente haciendo uso de la tecnología *microstrip*. Debido a estas dos características su diseño y posterior implementación es más compleja que la de los divisores resistivos ya que se debe considerar múltiples factores para garantizar la máxima transferencia de potencia entre la entrada y las salidas reduciendo las pérdidas al mínimo.

La Figura 1.1 muestra un divisor de potencia tipo Wilkinson. [7] [9]



**Figura 1.1** Esquema de un divisor de potencia tipo Wilkinson. (a) Ejemplo de implementación en tecnología *microstrip*; (b) Circuito equivalente con líneas de transmisión

El divisor de potencia tipo Wilkinson consta de tres secciones: el puerto entrada donde la línea *microstrip* deberá tener un ancho y una longitud previamente calculadas a fin de garantizar un valor de impedancia característica  $Z_0$  a la frecuencia de trabajo; la segunda sección debe estar diseñada de forma que mediante la longitud y el ancho de línea se consiga alcanzar una impedancia igual a  $\sqrt{2}Z_0$  en toda esta sección y una longitud eléctrica igual a  $\lambda/4$  o  $90^\circ$  a la frecuencia de trabajo; la última sección necesita tener una impedancia de  $Z_0$  en los dos puertos de salida y ambos puertos de salida deberán unirse mediante una resistencia de valor  $2Z_0$ .

Estas tres secciones juntas, en un diseño ideal, deberían producir un coeficiente de transmisión entre la entrada y cada una de las salidas de  $-3\text{dB}$  (en la realidad es común tener una pérdida adicional en cada ramal de aproximadamente  $0,5\text{ dB}$ ). [2] [7] [9]

## 1.4.2 REDES CONFORMADORAS DE HACES

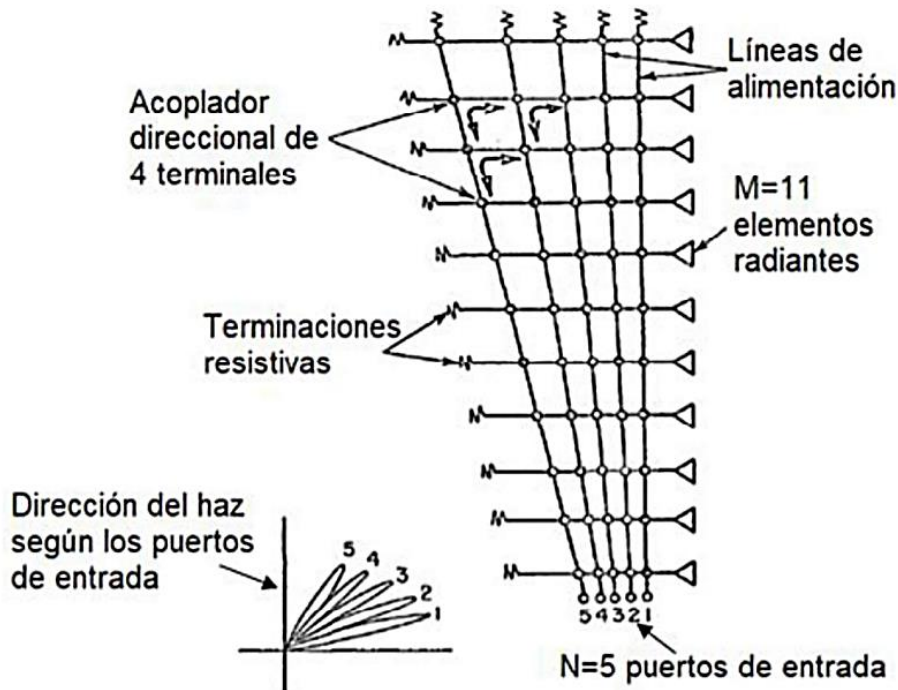
Una red conformadora de haces es un circuito que controla un conjunto de antenas que permite controlar la fase y la amplitud de la potencia acoplada a fin de obtener un patrón de radiación deseado proporcionando un lóbulo principal resultante con una dirección invariable. Una vez obtenido esto, se puede dirigir el lóbulo en dirección de un objeto deseado mediante la variación de algún parámetro en la red de alimentación (amplitud y/o fase). Las redes conformadoras de haces se clasifican según la forma geométrica que pueden tener en tres: serie, corporativas o espaciales. [4] [5] [8]

### 1.4.2.1 MATRIZ DE BLASS

La Figura 1.2 muestra un ejemplo de la matriz de Blass. Esta estructura está conformada por una red de varias líneas de transmisión mismas que están conectadas a un arreglo lineal de antenas, esta matriz está conformada por líneas de alimentación con

$M$  elementos radiantes,  $N$  puertos de entrada,  $M + N$  terminaciones resistivas y  $N \times M$  acopladores direccionales de cuatro terminales.

Si se tiene el mismo número de puertos de entrada y salida ( $N = M$ ) se requerirán  $N^2$  acopladores direccionales.



**Figura 1.2** Matriz de Blass con 5 puertos de entrada 11 salidas a elementos radiantes

Cuando se suministra una señal a un puerto de entrada, la señal va hacia los terminales de la resistencia, en cada uno de los terminales direccionales existe una pequeña señal

acoplada para excitar el elemento radiante correspondiente. La dirección del lóbulo resultante está definida por la diferencia de trayectoria entre la entrada de la señal y el elemento radiante. El aislamiento del puerto 1 está asegurado para el lóbulo 1 gracias a la directividad de los acopladores. Por otro lado, cuando se alimenta una señal a través del puerto 2, el lóbulo 2 se produce con un lóbulo de segundo orden debido al acoplamiento a través de la línea de alimentación del lóbulo 1.

Es importante mencionar que este tipo de arreglo requiere una gran cantidad de elementos lo cual implica una implementación y diseño más complejo.

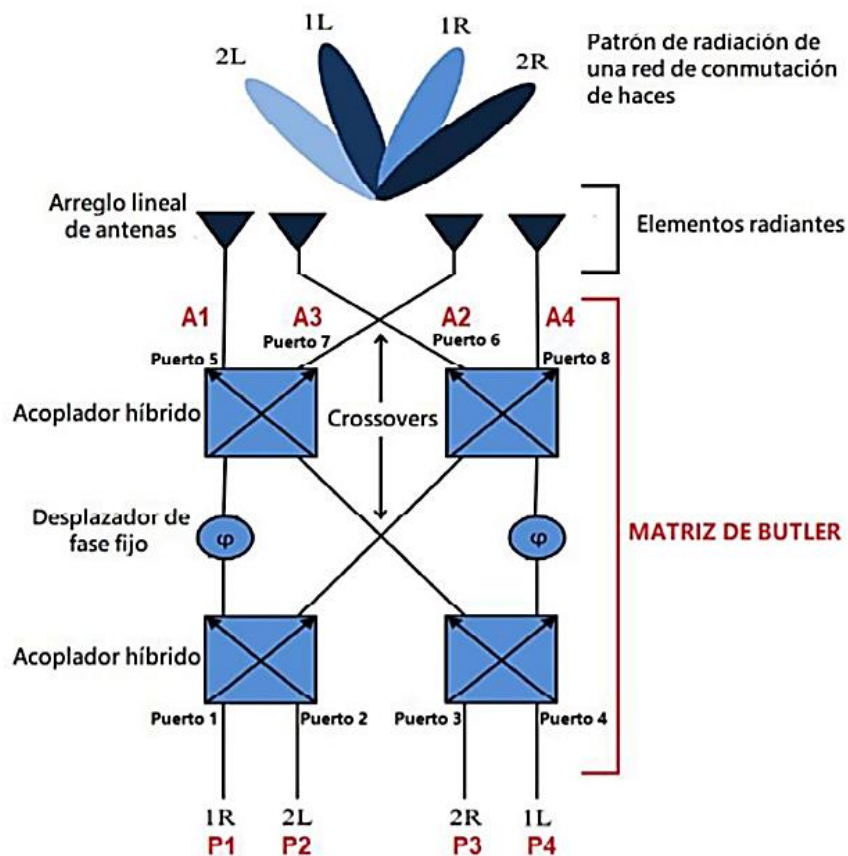
#### **1.4.2.2 MATRIZ DE BUTLER**

La red de alimentación conocida como matriz de Butler es una red pasiva de conformación de varios haces cuyo funcionamiento se basa en un barrido electrónico por conmutación de haces. El diseño estándar de esta red se describe como una red  $N \times N$  donde  $N$  es el número de puertos de entrada y de salida y deberá ser una potencia de 2 de la forma

$N = 2^n$  donde  $n$  es un número entero positivo.

La matriz de Butler tiene como principal propósito mejorar la relación portadora a interferencia CIR (*Carrier Interference Ratio*) mediante el uso de  $N$  haces además de la reutilización de la frecuencia en un sistema punto a multipunto. [5] [6] [8]

Comparándola con la matriz de Blass, la matriz de Butler reduce el número de componentes a construir. Particularmente, el número de empalmes se reduce de  $N^2$  a  $(N/2) \cdot \log_2(N)$ . La Figura 1.3 muestra un ejemplo de implementación de una matriz de Butler de  $4 \times 4$ . [5] [6] [8]



**Figura 1.3** Diagrama de bloques de una matriz de Butler 4 x 4 con un arreglo lineal de antenas [8]

Si se considera un matriz con  $N = 4$ , es evidente que se necesitan solo 4 acopladores híbridos para el circuito de Butler mientras que para el circuito de Blass se necesitarían 16 acopladores.

Una característica importante de la matriz de Butler es que tiene la capacidad de producir tantos haces como puertos de entrada tenga. Cada uno de los puertos de entrada está desacoplado y produce una distribución de amplitud y fase uniforme a través de los puertos adyacentes de salida.

### 1.4.3 ATENUADORES

Un atenuador es un dispositivo de dos puertos que reduce la amplitud de la señal de entrada, idealmente sin que exista reflexión, por lo tanto,  $S_{11} = 0$ . Los atenuadores pueden ser fijos o variables. En circuitos de microondas, los atenuadores suelen tener forma de redes simétricas resistivas del tipo T o  $\Pi$ . En cualquiera de los dos casos, se determina la atenuación  $L$  utilizando la relación dada en la ecuación (1.2).



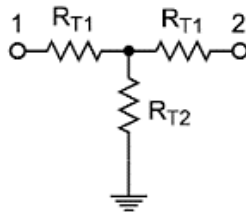
$$L = -20 \log(S_{21}) \quad (1.2)$$

Despejando la ecuación (1.2) se puede obtener el término  $S_{21}$  en función de la atenuación  $L$ . Esta relación se expresa en la ecuación (1.3)

$$S_{21} = 10^{-L/20} \quad (1.3)$$

### 1.4.3.1 ATENUADOR TIPO T

La Figura 1.4 muestra el circuito de implementación del atenuador tipo T.



**Figura 1.4** Circuito de implementación de un atenuador tipo T

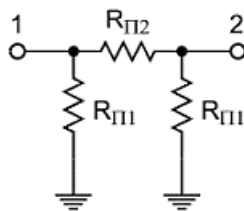
Desde el punto de vista de diseño, es necesario calcular los valores de las resistencias para una determinada atenuación. Las ecuaciones (1.4) y (1.5) detallan el cálculo necesario para determinar los valores de las resistencias.

$$R_{T1} = Z_0 \frac{1-S_{21}}{1+S_{21}} \quad (1.4)$$

$$R_{T2} = Z_0 \frac{2S_{21}}{1-S_{21}^2} \quad (1.5)$$

### 1.4.3.2 ATENUADOR TIPO Π

La Figura 1.5 muestra el circuito de implementación del atenuador tipo Π.



**Figura 1.5** Circuito de implementación de un atenuador tipo Π

De forma similar, mediante el uso de la matriz de admitancias se obtiene las fórmulas para diseñar un atenuador  $\Pi$ , dadas en las ecuaciones (1.6) y (1.7).

$$R_{\Pi 1} = Z_0 \frac{1+S_{21}}{1-S_{21}} \quad (1.6)$$

$$R_{\Pi 2} = Z_0 \frac{1-S_{21}^2}{2S_{21}} \quad (1.7)$$

#### 1.4.4 DISTRIBUCIONES MATEMÁTICAS

Una distribución matemática se puede definir de manera resumida como la asignación de los pesos a cada uno de los coeficientes de los elementos de un polinomio o función conformada por  $N$  elementos.

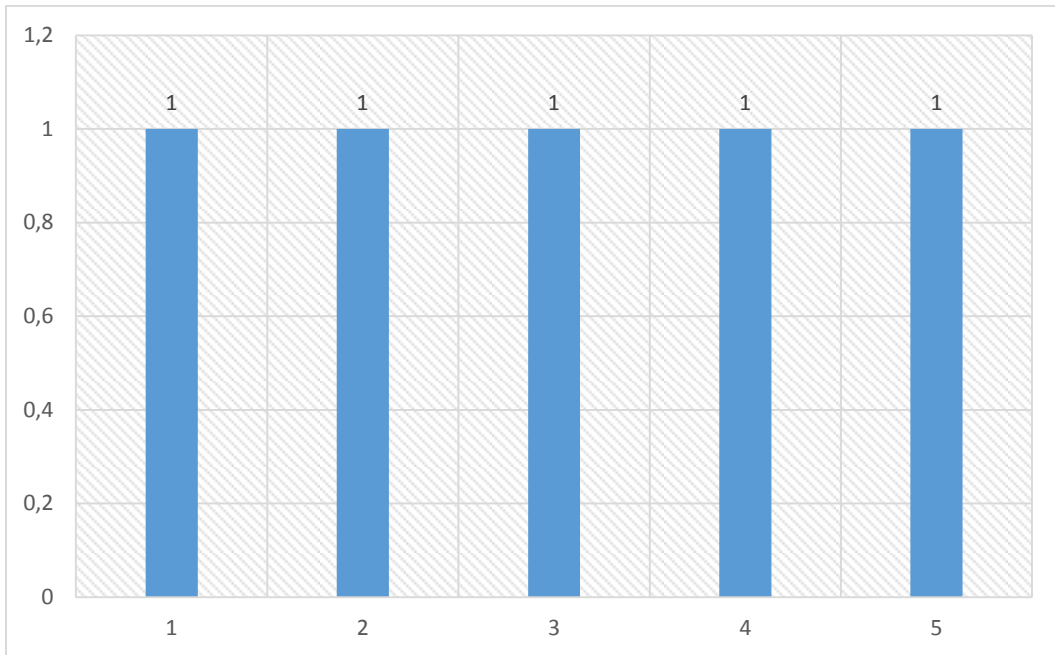
A continuación, se presentan las características más destacables de las distribuciones más relevantes para este proyecto.

##### 1.4.4.1 DISTRIBUCIÓN UNIFORME

Una distribución uniforme discreta es aquella en la cual los pesos de todos sus elementos son iguales y si se habla de una distribución de probabilidad uniforme su principal característica es que la misma será simétrica, es decir, en situaciones donde entre  $n$  resultados diferentes todos tienen la misma probabilidad de ocurrir. [10]

En la Figura 1.6 se puede apreciar como luce una distribución uniforme de 5 elementos en base a un polinomio ejemplo dado en la ecuación (1.8).

$$P(Z) = 1 + Z + Z^2 + Z^3 + Z^4 \quad (1.8)$$



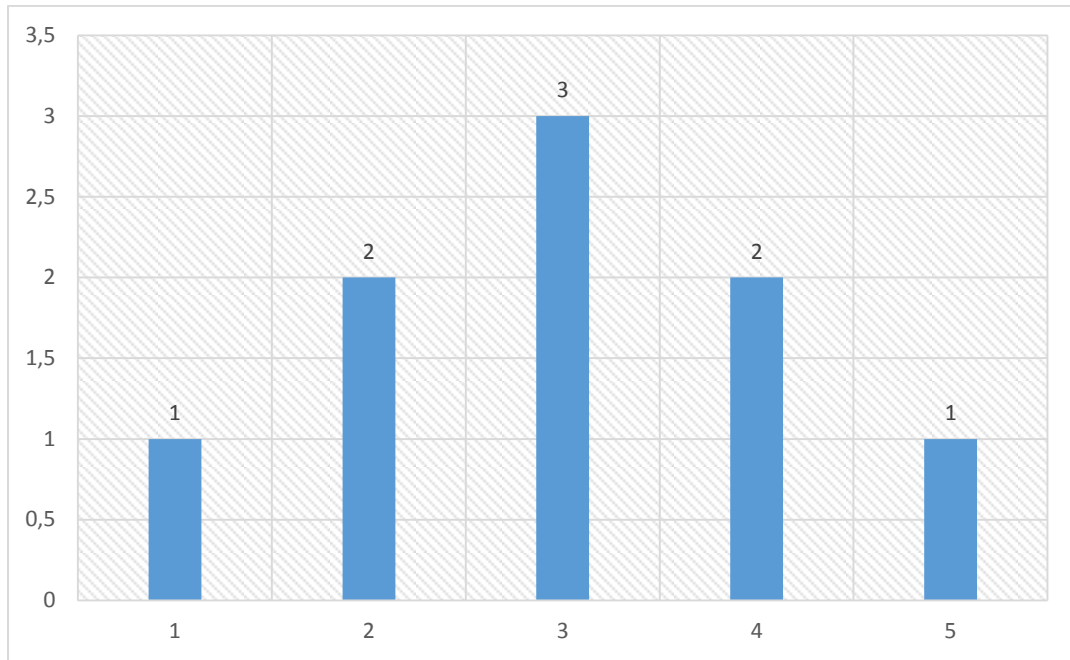
**Figura 1.6** Ejemplo de una distribución uniforme de 5 elementos

#### 1.4.4.2 DISTRIBUCIÓN TRIANGULAR

La distribución triangular tiene su nombre debido a la forma que tiene la gráfica resultante con todos los pesos de las variables. En esta distribución los pesos van incrementando en 1 hasta llegar al elemento central siendo el peso del elemento central el máximo que podrá tener un elemento, luego del elemento central los valores empezaran a descender hasta volver a alcanzar el valor de 1. Una de las características principales de este tipo de distribuciones es que  $N$  (número de elementos) es impar en todas las ocasiones. [10]

En la Figura 1.7 se puede apreciar como luce una distribución triangular de 5 elementos en base a un polinomio de ejemplo dado en la ecuación (1.9).

$$P(Z) = 1 + 2Z + 3Z^2 + 2Z^3 + Z^4 \quad (1.9)$$



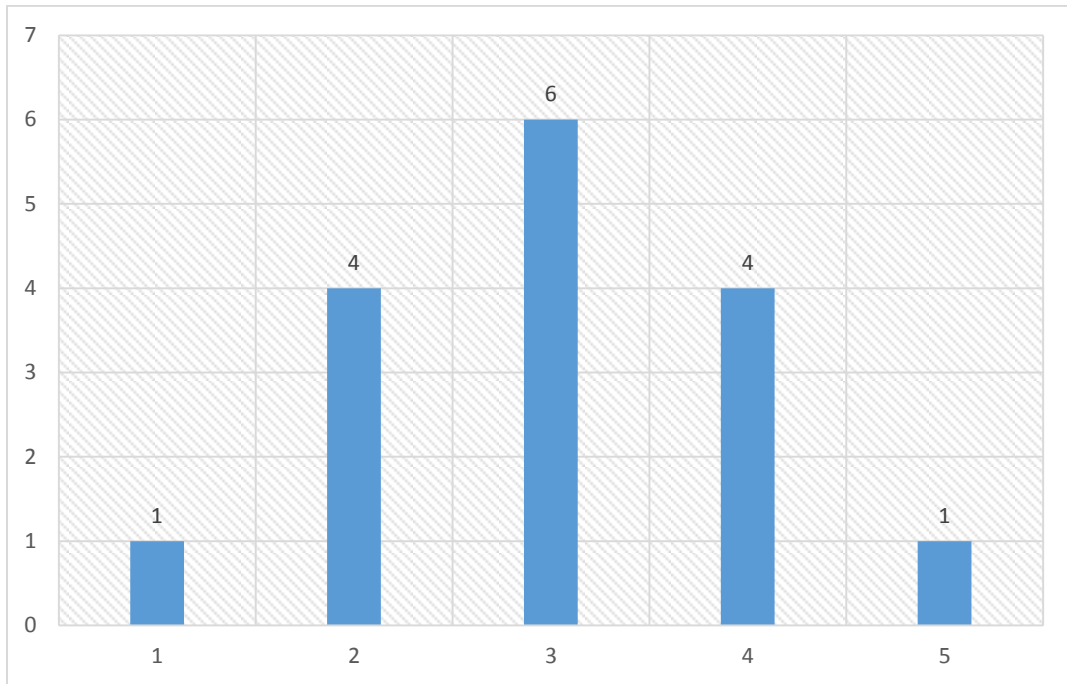
**Figura 1.7** Ejemplo de una distribución triangular de 5 elementos

#### 1.4.4.3 DISTRIBUCIÓN BINOMIAL

La distribución binomial se caracteriza por poseer la forma de un binomio elevado a una potencia de grado  $n$  donde  $N$  será el número de elementos totales del polinomio resultante y está definido como  $N = n + 1$ . Los pesos de cada uno de los elementos de la distribución binomial serán iguales al valor de los coeficientes del polinomio resultantes. [10]

En la Figura 1.8 se puede apreciar como luce una distribución binomial de 5 elementos en base a un polinomio ejemplo dado en la ecuación (1.10).

$$P(Z) = 1 + 4Z + 6Z^2 + 4Z^3 + Z^4 \quad (1.10)$$



**Figura 1.8** Ejemplo de una Distribución binomial de 5 elementos

## 2 METODOLOGÍA

El presente capítulo se presenta el diseño de una red de alimentación en tecnología *microstrip* para la alimentación no uniforme de un arreglo lineal de antenas. Este proyecto se diseñó para observar y comparar dos tipos de redes de alimentación, una binomial y otra triangular. Cabe mencionar que ambos esquemas son prácticamente idénticos en su diseño y la única diferencia entre los mismos radica en las relaciones requeridas en los atenuadores correspondientes a cada caso.

El paso inicial para el diseño es calcular las dimensiones de las líneas de transmisión mediante las cuales se conseguirá satisfacer los valores de impedancia requeridos. Una vez realizado esto se procederá con el diseño y posterior simulación del divisor de potencia tipo Wilkinson. Se combinarán los divisores con los atenuadores correspondientes a cada esquema, para finalmente y luego de todas las correcciones pertinentes en la simulación, proceder con la fabricación de los circuitos impresos.

- Enfoque: mixto.
- Tipo de trabajo: experimental.
- Técnica de recolección de información: mediciones.
- Técnica de análisis de la información: Cuantificación de la diferencia entre los valores medidos para ambas redes.

### 2.1 DISEÑO DE LOS DIVISORES DE POTENCIA TIPO WILKINSON

Para el diseño de este proyecto se utiliza el software de simulación Keysight® Advanced Design System (ADS) el mismo que proporciona la herramienta “Linecalc” la cual permite determinar las dimensiones que deben tener las líneas según características como el sustrato que se utilizará y la frecuencia de trabajo a fin de obtener las impedancias características requeridas. En la Tabla 2.1 se presenta las características del sustrato FR4, el cual ha sido elegido para la realización de las redes por su versatilidad, bajo coste y disponibilidad en el mercado.

**Tabla 2.1** Especificaciones mecánicas y eléctricas para el sustrato FR4

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
$h$	Espesor del sustrato	1,5	mm
$t$	Espesor de las capas de cobre	17	$\mu\text{m}$
$\tan \delta$	Tangente de pérdidas del sustrato	0,02	-
$\epsilon_T$	Permitividad relativa del sustrato	4,4	-

### 2.1.1 DISEÑO DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DEL DIVISOR DE POTENCIA

Para el diseño de un divisor Wilkinson se utilizan dos líneas de transmisión, una con impedancia  $Z_0 = 50 \Omega$  y la otra con impedancia  $\sqrt{2}Z_0 = 70,71 \Omega$ . Para realizar el diseño de las líneas se utiliza el software Keysight® ADS dentro del cual se puede modelar y dimensionar cada una de las líneas del diseño.

La Tabla 2.2 detalla las dimensiones obtenidas para las líneas de transmisión.

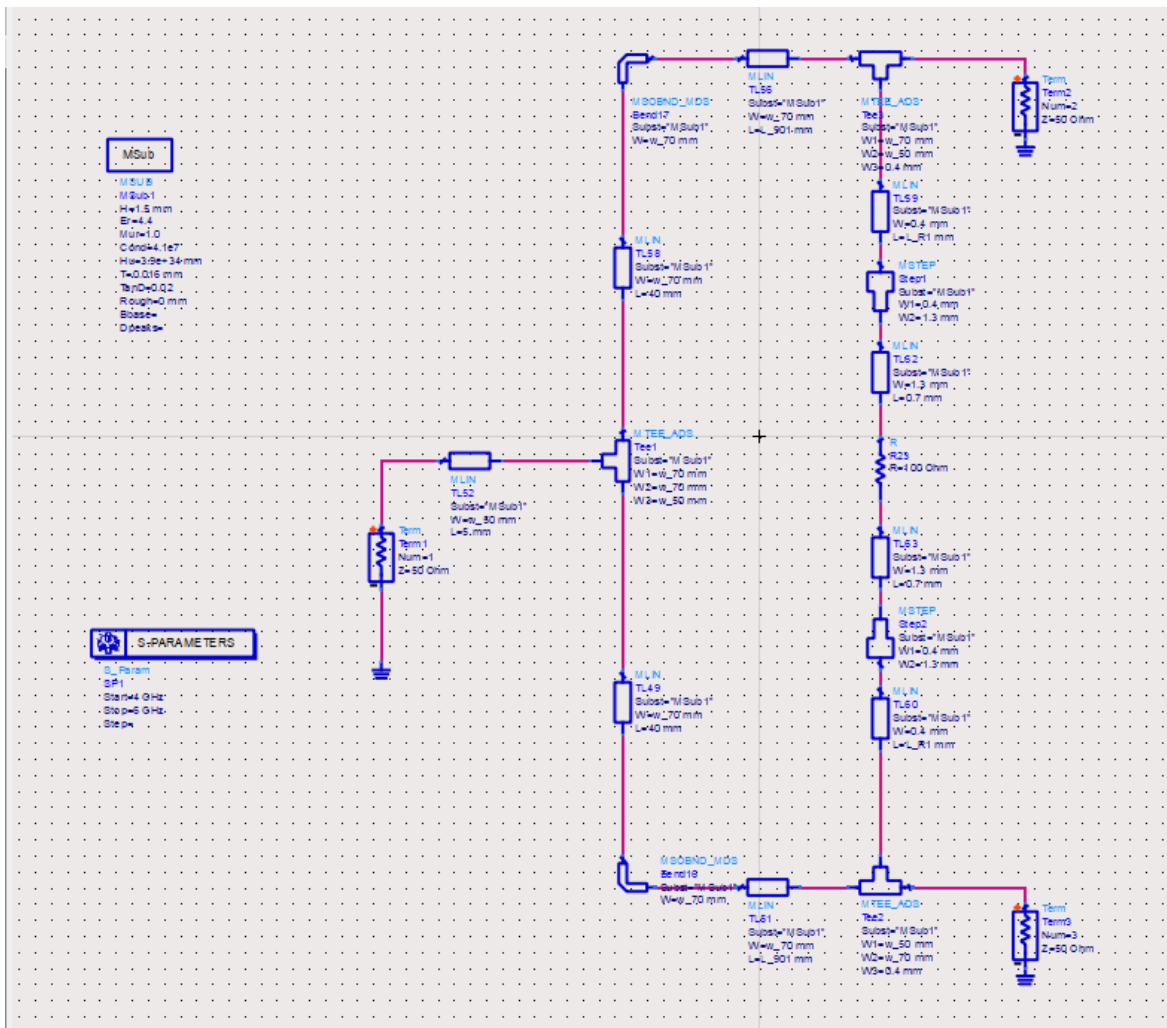
**Tabla 2.2.** Dimensiones de las líneas de transmisión requeridas para el divisor de potencia tipo Wilkinson calculadas con la herramienta LineCalc

LÍNEA	PARÁMETRO	DIMENSIÓN
50 $\Omega$	Ancho ( $W$ )	2,88 mm
70,7 $\Omega$	Ancho ( $W$ )	1,54 mm
	Largo ( $L$ ) $\rightarrow$ correspondiente a una longitud eléctrica de 90°	8,40 mm

### 2.1.2 SIMULACIÓN DEL DIVISOR POTENCIA WILKINSON 1:8 EN ADS

Una vez que se han calculado los valores de  $W$  y  $L$  para cada una de las impedancias en las líneas se procede con la simulación. El proyecto que se diseña necesitará contar con un divisor de potencia tipo Wilkinson 1:8 ya que se requiere tener 5 salidas y una de las características de los divisores Wilkinson implementados en tecnología planar es que el número de salidas con una potencia simétrica es igual a  $2^n$  donde  $n$  es un entero positivo.

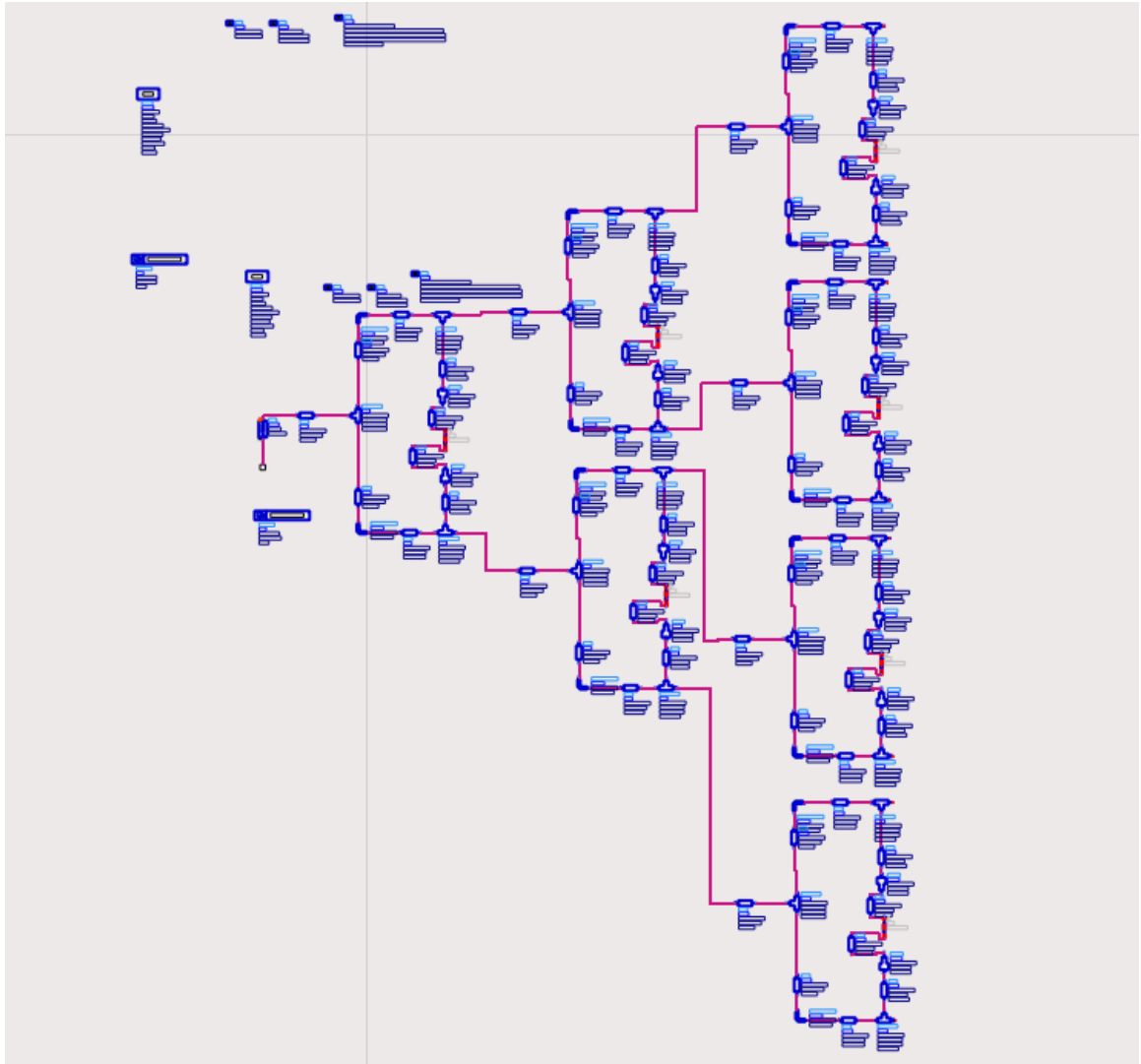
La base para diseñar el divisor de potencia tipo Wilkinson 1:8 es el divisor similar 1:2 tal como se presenta en la Figura (2.1).



**Figura 2.1** Circuito esquemático de implementación del divisor de potencia tipo Wilkinson 1:2

Seguidamente, se procede a conectar un divisor de potencia tipo Wilkinson 1:2 de características similares a cada una de las salidas del primer divisor tipo Wilkinson 1:2. De esta manera, se consigue tener como resultado un divisor 1:4. Este proceso se repite, de tal forma que se consigue un divisor 1:8. El circuito resultante se puede apreciar en la Figura 2.2.





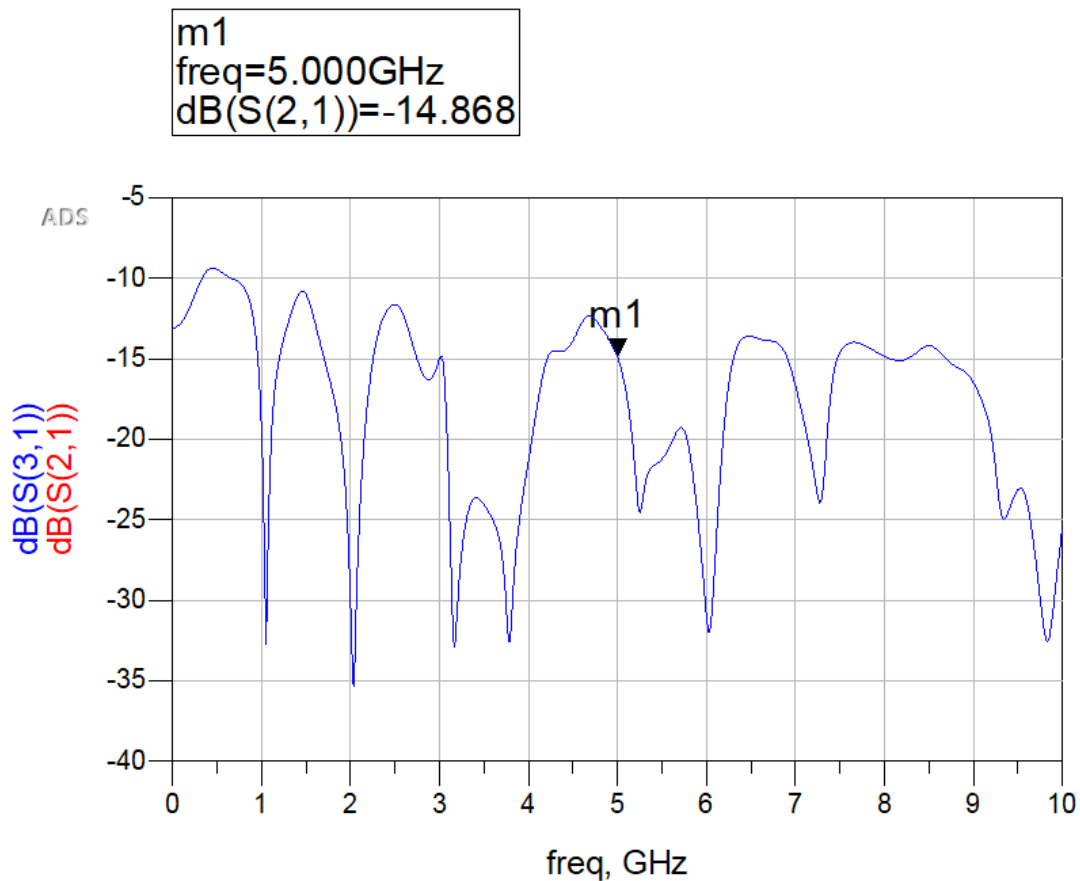
**Figura 2.2** Circuito esquemático de implementación del divisor de potencia tipo Wilkinson 1:8

La Tabla 2.3 muestra los parámetros optimizados del divisor 1:8.

**Tabla 2.3** Dimensiones finales para el Divisor wilkinson 1:8

<b>ELEMENTO</b>	<b>VARIABLE CORRESPONDIENTE EN LA FIGURA 2.2</b>	<b>DIMENSION FINAL (mm)</b>
Ancho línea de 50 $\Omega$	W_50	2,93
Ancho línea de 70,71 $\Omega$	W_70	1,78
Longitud línea 1 de 70,71 $\Omega$	L_90	19,43
Longitud línea 2 de 70,71 $\Omega$	L_901	16,46
Longitud línea 3 de 70,71 $\Omega$	L_902	13,08

La Figura 2.3 muestra los parámetros de transmisión entre la entrada y dos de las salidas, respectivamente, del divisor 1:8. Los otros parámetros de transmisión en las otras salidas son exactamente iguales. Se puede apreciar un factor por pérdidas de inserción de 14,87 dB. Al realizarse la estructura sobre un substrato de bajo costo, las pérdidas son considerables, esto es, en un divisor ideal el valor esperado para el factor de pérdidas es de 9 dB con lo que, debido a la frecuencia de operación (la cual demanda mucho de las características del substrato), la longitud de las líneas (para un adecuado posicionamiento), y la utilización de dos etapas de bifurcación se tiene alrededor de 5 dB de pérdidas. Sin embargo, el objetivo del divisor, para este proyecto, no está enfocado en la eficiencia del mismo si no en proporcionar una división de potencia equitativa la cual se comprueba con el resultado presentado.



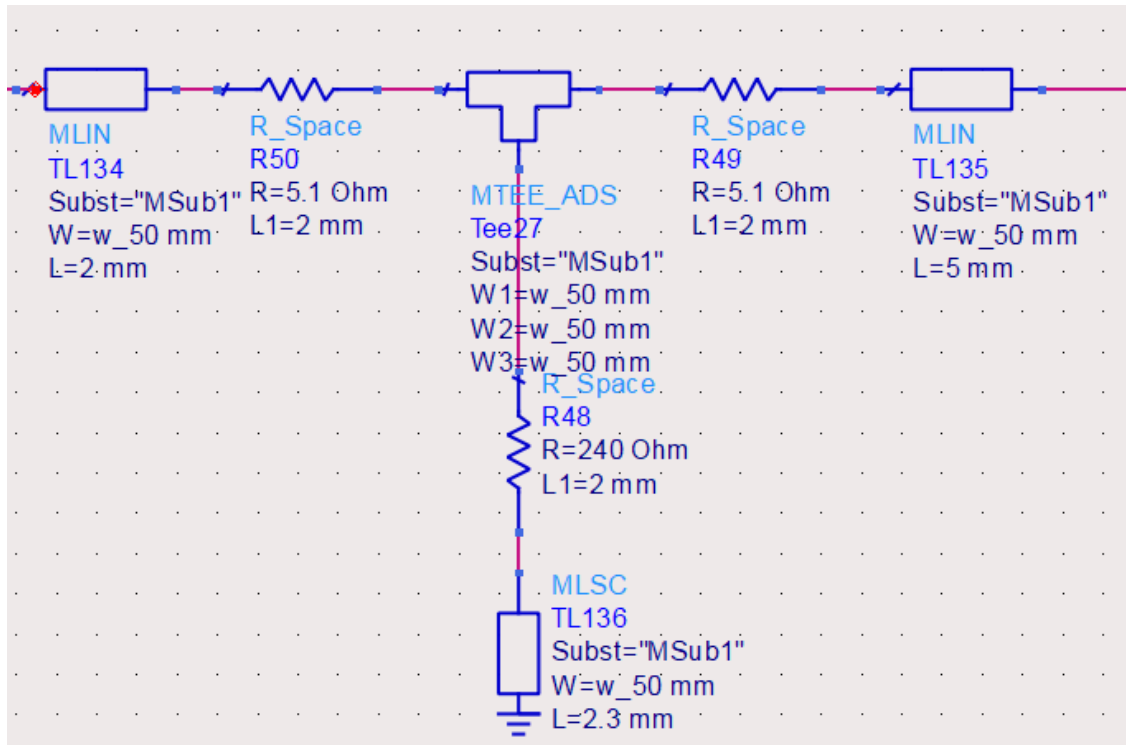
**Figura 2.3** Parámetro de transmisión entre la entrada y dos de las salidas del divisor 1:8

### 2.1.3 DISEÑO DE LAS LÍNEAS PARA LOS ATENUADORES

Una vez que se ha logrado tener un divisor 1:8 el siguiente paso es el diseño de las líneas en el software ADS sobre las cuales se implementarán los distintos atenuadores a fin de conseguir una distribución triangular y binomial.

Cabe mencionar que las líneas están diseñadas para una posterior implementación con resistencias SMD de tamaño 0805. Para este proceso el valor de resistencia de los atenuadores no es relevante en el diseño *microstrip* pues con la resistencia por defecto es más que suficiente ya que el parámetro que importa es el espacio que ocupan físicamente cada una de las resistencias SMD.

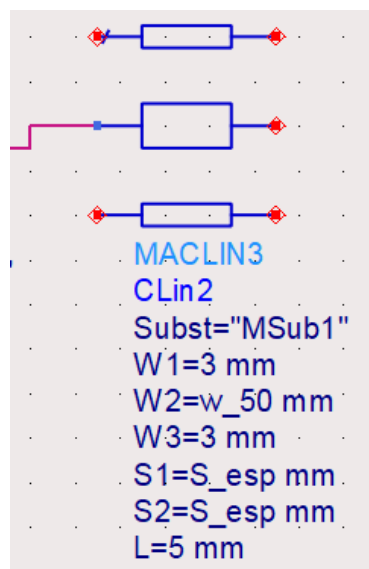
La Figura 2.4 muestra el diseño implementado en ADS con las resistencias para los atenuadores tipo T. El diseño de cada uno de los atenuadores se presentará posteriormente en la sección 2.2.



**Figura 2.4** Sección del circuito atenuador en las salidas específicas del divisor 1:8

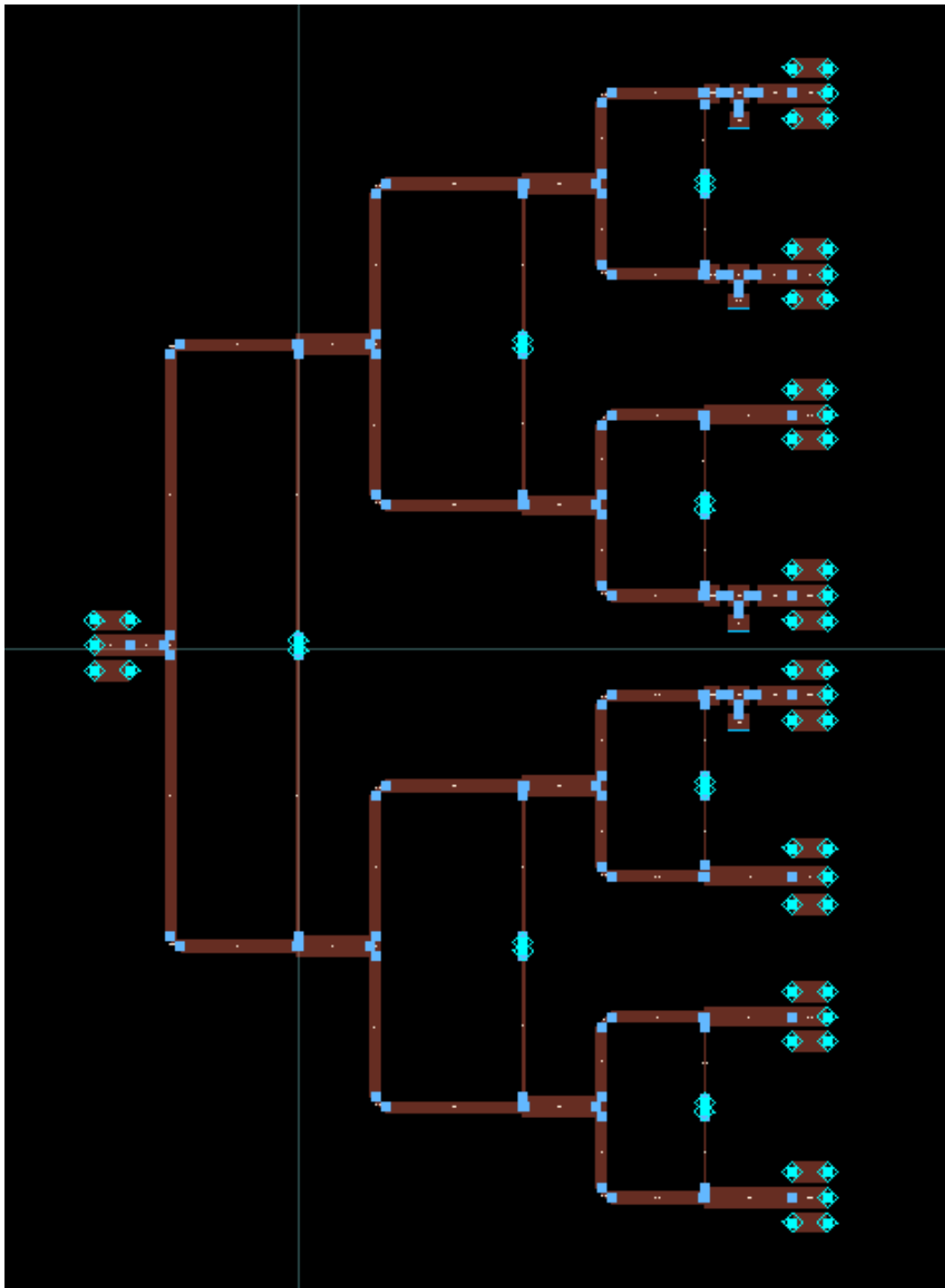
## 2.1.4 FINALIZACIÓN DE LA RED DE ALIMENTACIÓN

Para concluir con la fase de diseño se debe colocar los terminales en las placas para que en los mismos se pueda soldar conectores SMA de entrada y salida como se muestra en la Figura 2.5.



**Figura 2.5** Estructura para los *pads* para conexión con los conectores SMA

La Figura 2.6 muestra el *layout* de toda la red de alimentación



**Figura 2.6** Diseño terminado Divisor Wilkinson 1:8 con atenuadores

## 2.2 DISEÑO DE LOS ATENUADORES DE POTENCIA

Para continuar con el diseño y posterior implementación de este proyecto se necesita realizar los cálculos de las resistencias que conforman los atenuadores de potencia tipo T conectados a las salidas específicas de la red de alimentación.

Como primer paso se normalizarán el valor de todos pesos tanto para las ecuaciones (2.1) y (2.3) de las distribuciones triangular como la binomial de 5 elementos respectivamente para obtener como resultado las ecuaciones normalizadas correspondientes a las distribuciones triangular representada en la ecuación (2.2) y la ecuación (2.4) para la distribución binomial.

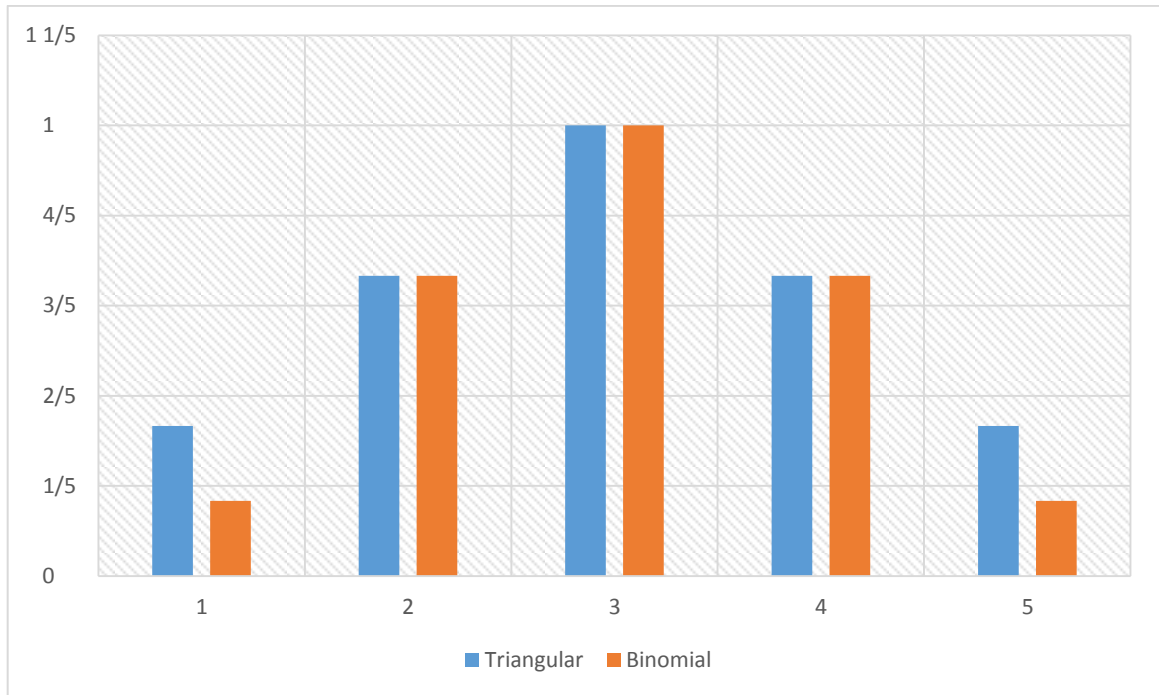
$$P(Z) = 1 + 2Z + 3Z^2 + 2Z^3 + Z^4 \quad (2.1)$$

$$P(Z) = \frac{1}{3} + \frac{2}{3}Z + Z^2 + \frac{2}{3}Z^3 + \frac{1}{3}Z^4 \quad (2.2)$$

$$P(Z) = 1 + 4Z + 6Z^2 + 4Z^3 + Z^4 \quad (2.3)$$

$$P(Z) = \frac{1}{6} + \frac{2}{3}Z + Z^2 + \frac{2}{3}Z^3 + \frac{1}{6}Z^4 \quad (2.4)$$

La Figura 2.7 representa la relación de potencia que se esperara tener en cada una de las 5 salidas del proyecto para las dos distribuciones seleccionadas.



**Figura 2.7** Grafico comparativo de las distribuciones triangular y binomial normalizadas

La Tabla 2.4 muestra la relación en veces y en dB de las atenuaciones requeridas en el cada una de las distribuciones

**Tabla 2.4** Equivalencia de atenuaciones

DISTRIBUCION	ATENUACION EN VECES	ATENUACION EN (dB)
TRIANGULAR	1/3	-4,77
	2/3	-1,76
BINOMIAL	1/6	-7,78
	2/3	-1,76

Estos cálculos son necesarios para poder determinar los valores de las resistencias R1 y R2 que conformaran cada uno de los atenuadores tipo T que se puede apreciar en la Figura 2.8. Además, otro valor indispensable será el de la impedancia característica  $Z_0 = 50 \Omega$ .

Las ecuaciones (2.8) y (2.9) permiten el dimensionamiento de las resistencias para el atenuador. [7]

$$R1 = Zo \left( \frac{10^{\frac{AdB}{20}} - 1}{10^{\frac{AdB}{20}} + 1} \right) \quad (2.8)$$

$$R2 = 2Zo \left( \frac{10^{\frac{AdB}{20}}}{10^{\frac{AdB}{10}} - 1} \right) \quad (2.9)$$

La Tabla 2.5 muestra los valores obtenidos de las resistencias acorde a la cantidad de atenuación requerida en cada caso.

**Tabla 2.5** Valores de resistencias atenuadores

DISTRIBUCION	ATENUADOR		VALOR CALCULADO ( $\Omega$ )	VALOR COMERCIAL SELECCIONADO ( $\Omega$ )
TRIANGULAR	ATENUADOR 1/3	R1	13,39	15
		R2	86,63	91
	ATENUADOR 2/3	R1	5,05	5,1
		R2	245,07	240
BINOMIAL	ATENUADOR 1/6	R1	21	22
		R2	49	51
	ATENUADOR 2/3	R1	5,05	5,1
		R2	245,07	240

## 2.3 FABRICACIÓN DE LOS CIRCUITOS IMPRESOS

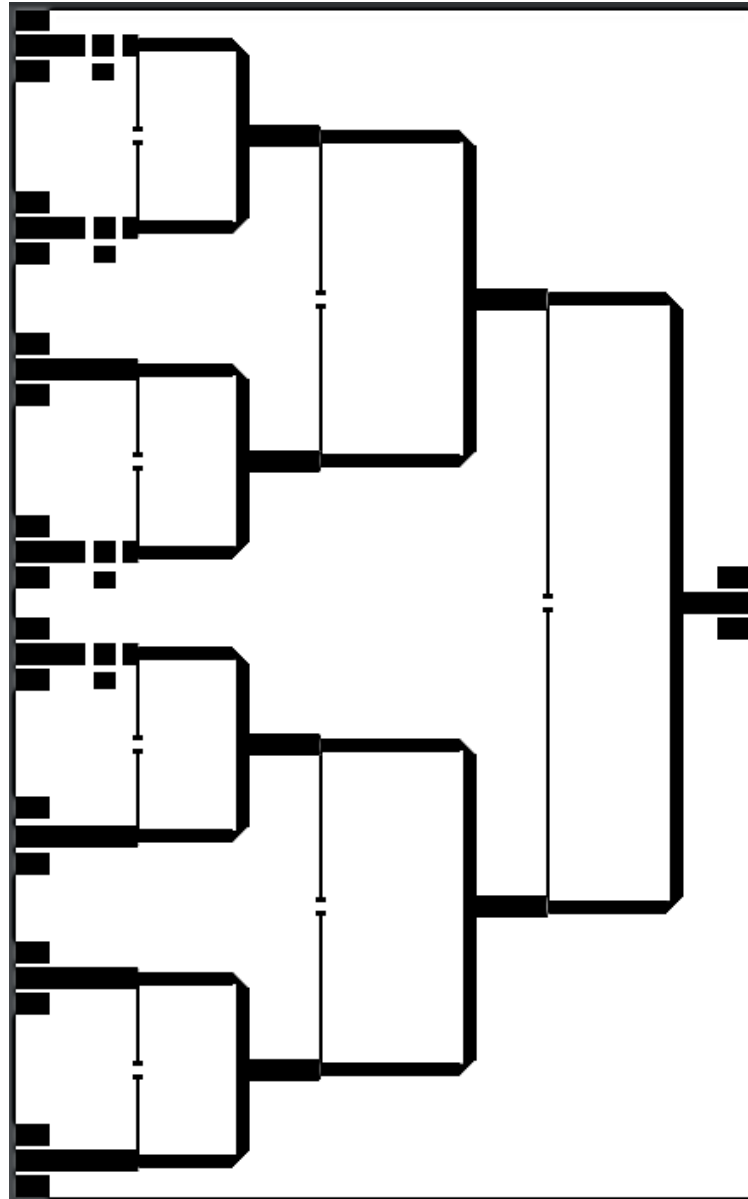
Esta sección describe de manera breve el procedimiento para la fabricación de las placas para este proyecto.

### 2.3.1 EXPORTACIÓN DE ARCHIVOS PARA FABRICACION

Una vez que se obtuvo el diseño definitivo para los dos circuitos del presente proyecto el siguiente paso es exportarlo a un formato adecuado (en este caso PDF) para su posterior



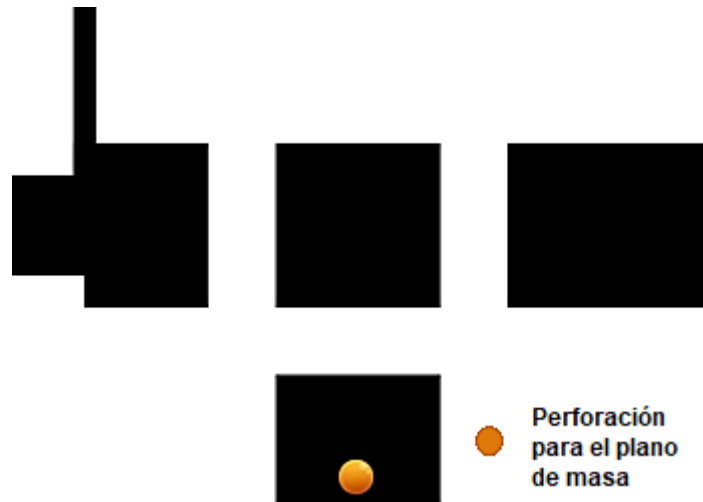
fabricación cumpliendo con las dimensiones para todas las líneas *microstrip*. Como se muestra en la Figura 2.8.



**Figura 2.8** Esquema de diseño del circuito de alimentación

### **2.3.2 PERFORACIÓN Y CORTOCIRCUITADO (PUESTA A TIERRA)**

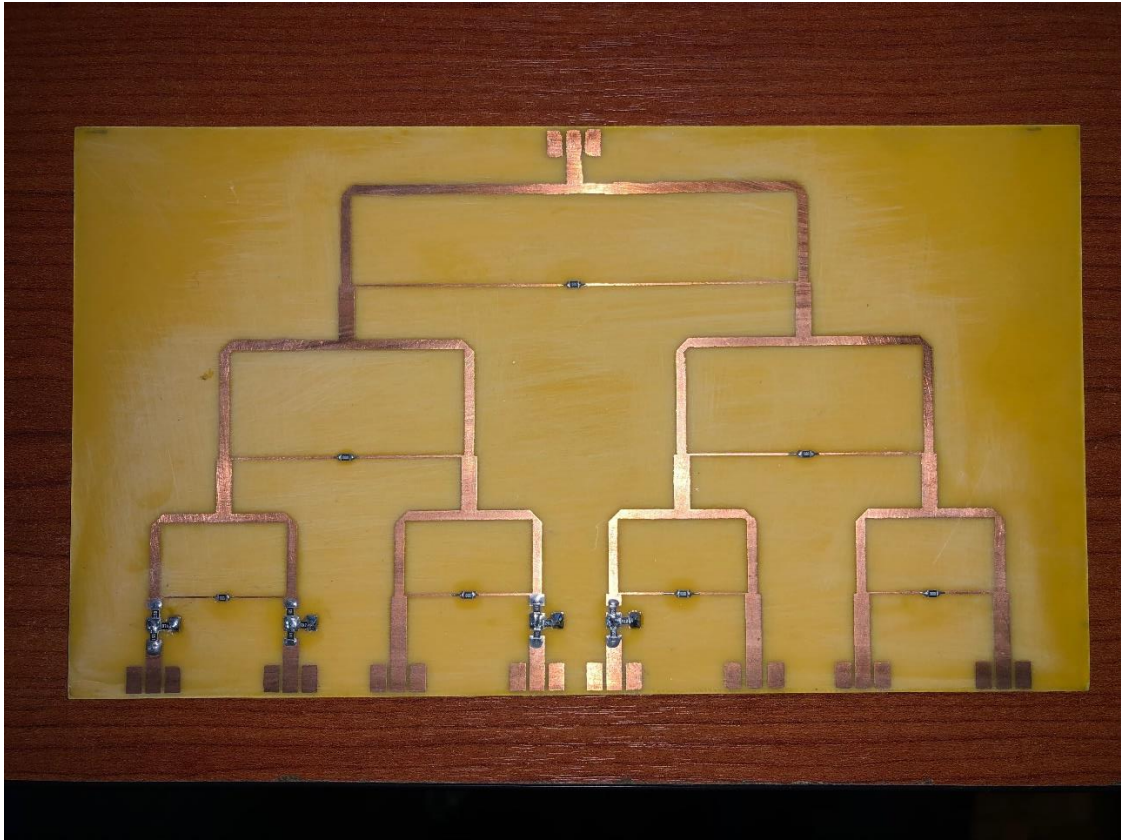
Es importante mencionar que el substrato utilizado debe ser de doble cara, pues la cara posterior actuará como plano de masa para todo el circuito. Para esto se realizará una perforación y posterior cortocircuitado en los puntos de cada uno de los atenuadores tipo T como se muestra en la Figura 3.2.



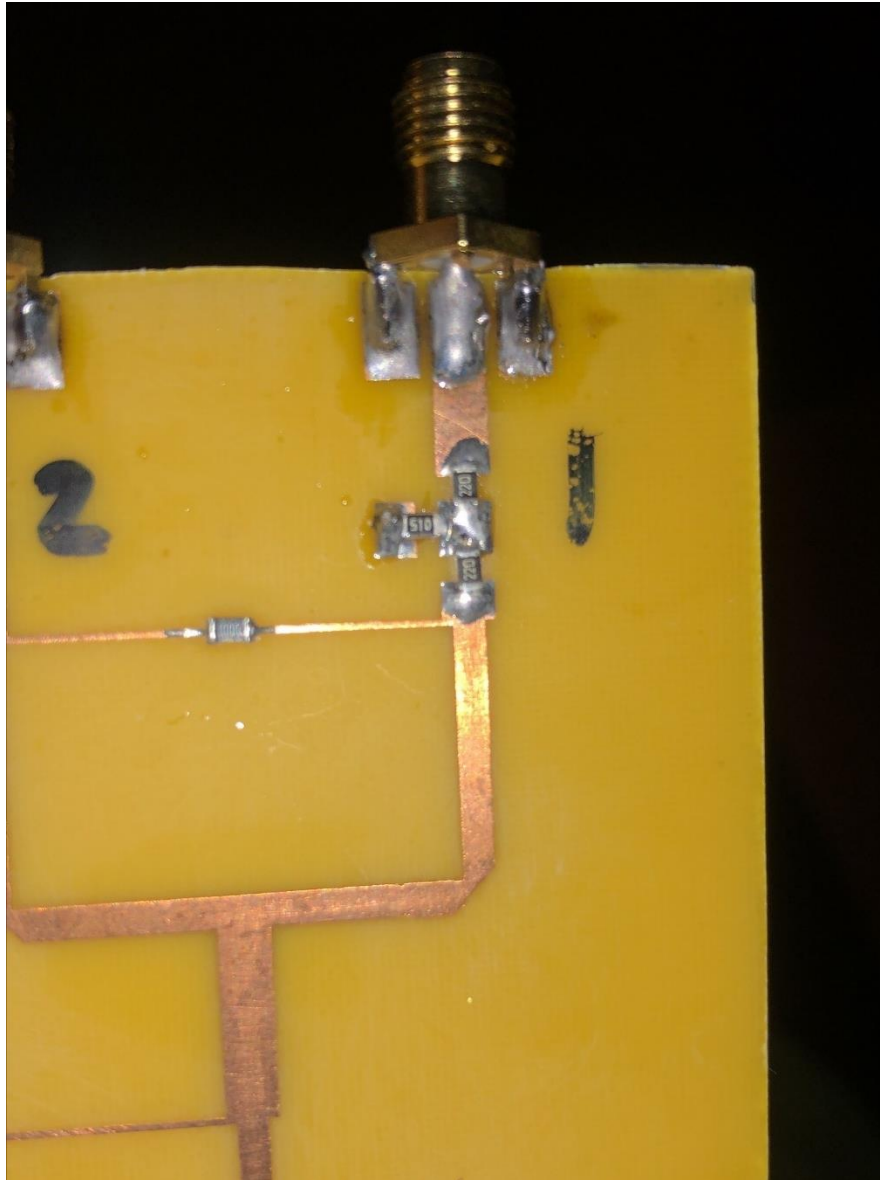
**Figura 2.9** Ubicación del lugar de la perforación para conexión con el plano de masa.

### **2.3.3 SOLDADURA DE ELEMENTOS EN LAS PLACAS**

Una vez realizada la perforación, el siguiente paso es la colocación y suelda de las resistencias SMD 0805 con los valores detallados anteriormente en las Tabla 2.5 resultando como se puede apreciar en la Figura 2.10. Además de los conectores SMA en los terminales de entrada y salida en ambos substratos como se puede observar en la Figura 2.11.

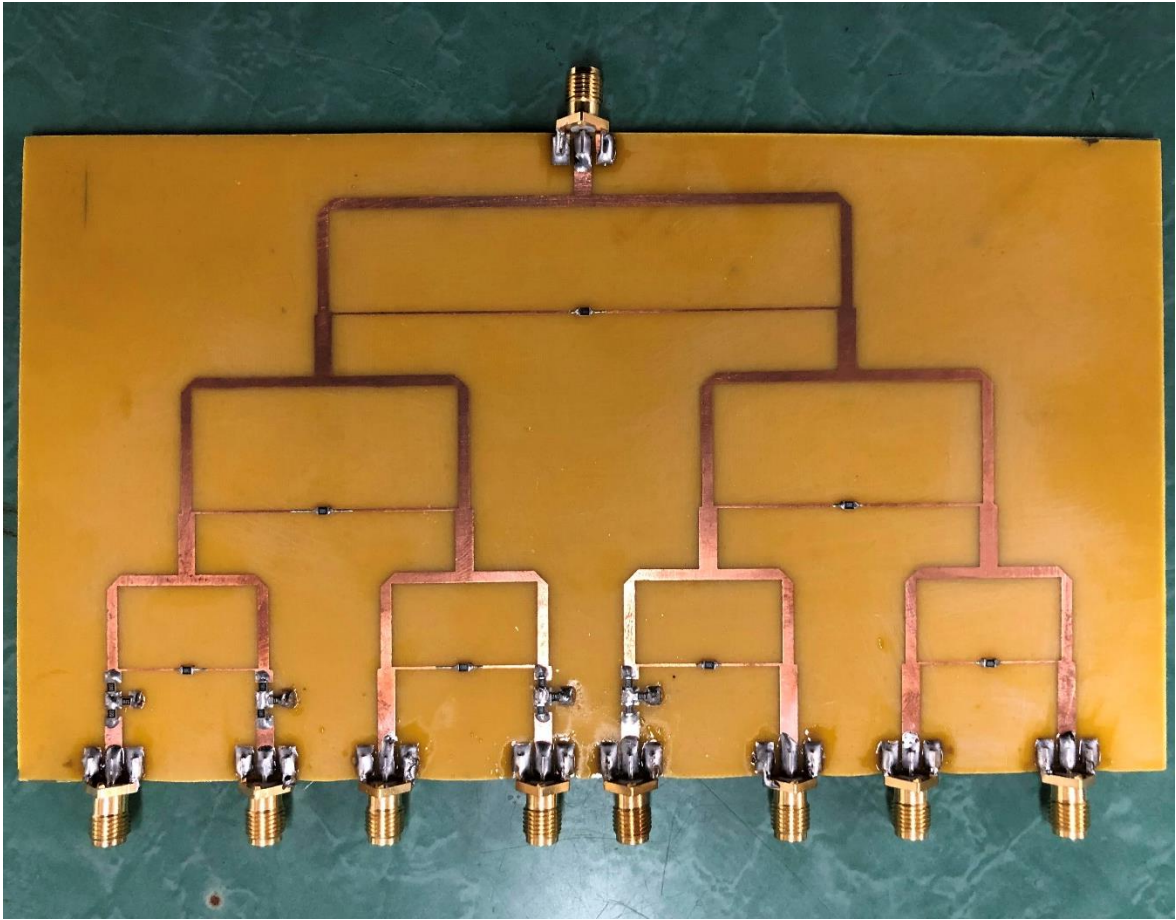


**Figura 2.10** Placa con resistencias SMD 0805 soldadas



**Figura 2.11** Soldadura de un conector SMA en uno de los puertos de salida

Dando así por terminada la fabricación de las placas y el resultado final se observa en las Figuras 2.12 y 2.13 siendo éstas las caras frontal y posterior respectivamente.



**Figura 2.12** Cara frontal de la placa divisor Wilkinson 1:8 terminada





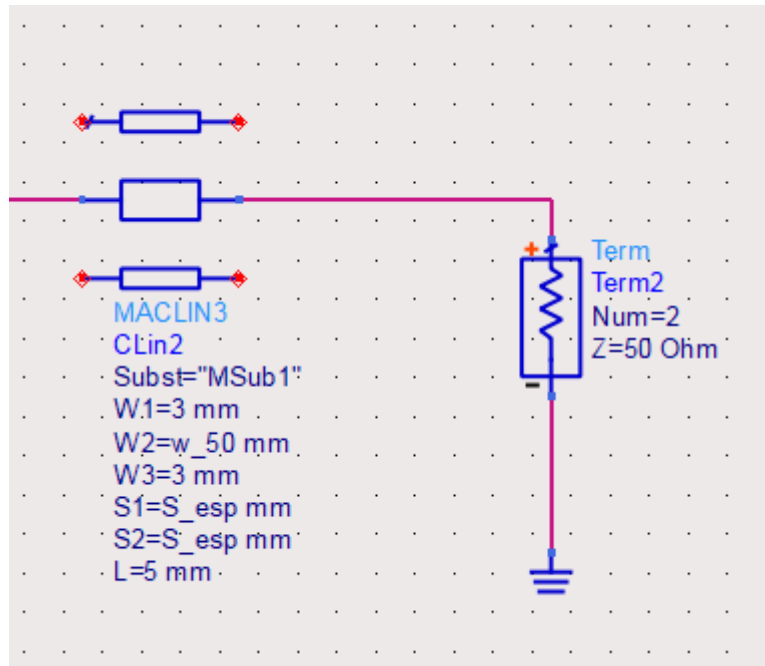
**Figura 2.13** Cara posterior de la placa divisor Wilkinson 1:8 terminada

### **2.3.4 OBTENCIÓN DE DATOS DE LOS DISEÑOS SIMULADOS Y CONSTRUIDOS**

Una vez que sea a concluido con la implementación de los dos circuitos, el siguiente paso será la recolección de los datos necesarios. Para este proyecto, los mismos serán los 4 parámetros S correspondientes a cada una de las salidas, tanto en los circuitos simulados como los implementados.

#### **2.3.4.1 OBTENCIÓN DE PARÁMETROS S EN LA SIMULACION**

Como ya se mencionó será necesario la toma de datos de los parámetros S en cada uno de los circuitos simulados, con este propósito el primer paso será la colocación de cargas de  $50 \Omega$  conectadas a tierra con la finalidad de que el circuito se encuentre debidamente acoplado, además que los mismos indicarán entre qué puntos se realizará la medición de los parámetros S.



**Figura 2.14** Conexión de impedancias en los terminales de salida y entrada

La Tabla 2.6 resume las magnitudes de los parámetros S simulados en ambas configuraciones para una frecuencia de 5 GHz.

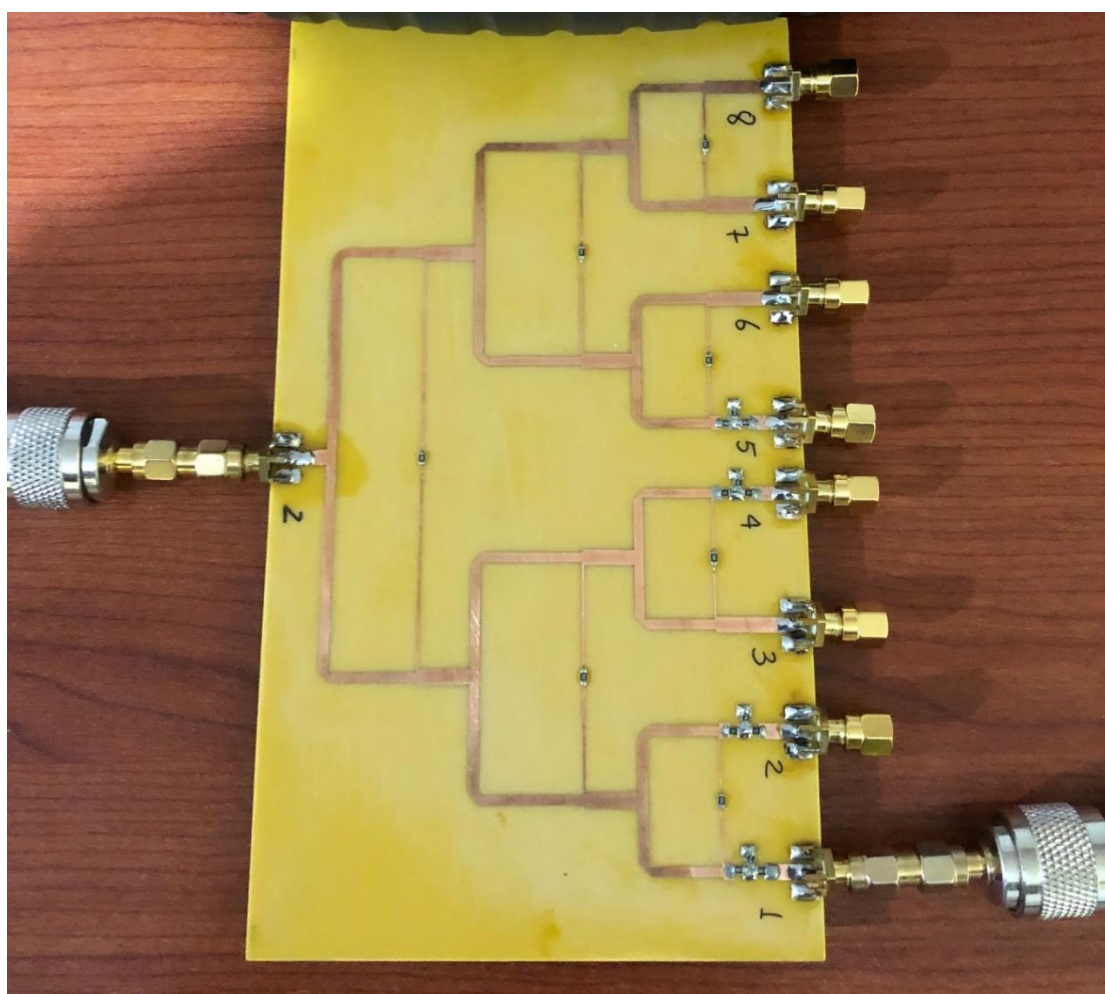
**Tabla 2.6** Parámetros S simulados obtenidos en los circuitos con distribución triangular y binomial

Distribución triangular					
Sij	Salida 1 [dB]	Salida 2 [dB]	Salida 3 [dB]	Salida 4 [dB]	Salida 5 [dB]
<b>S11</b>	-9,1	-9,1	-9,1	-9,1	-9,1
<b>S12</b>	-19,74	-17,01	-15,28	-16,75	-19,66
<b>S21</b>	-19,74	-17,01	-15,28	-16,75	-19,66
<b>S22</b>	-23,01	-22,45	-15,73	-23,11	-22,8
Distribución binomial					
Sij	Salida 1 [dB]	Salida 2 [dB]	Salida 3 [dB]	Salida 4 [dB]	Salida 5 [dB]
<b>S11</b>	-9,01	-9,01	-9,01	-9,01	-9,01
<b>S12</b>	-21,95	-17,24	-15,32	-16,8	-21,87
<b>S21</b>	-21,95	-17,24	-15,32	-16,8	-21,87
<b>S22</b>	-16,825	-22,12	-15,74	-23,11	-16,74

### 2.3.4.2 MEDICIÓN DE PARÁMETROS S EN LOS PROTOTIPOS CONSTRUIDOS

Para realizar las medidas en los prototipos construidos se debe colocar cargas acopladas coaxiales de  $50 \Omega$  en todas las salidas a excepción de la entrada y la salida que se desea medir. Para las mediciones se utilizó el analizador vectorial de redes Keysight Fieldfox Microwave Analyzer N9916A adecuadamente calibrado.

La Figura 2.15 muestra una fotografía de la configuración utilizada para la medición de los parámetros S entre la entrada y la salida 1 (para las demás medidas será de manera similar). Nótese que se ha utilizado adaptadores N-SMA y SMA-SMA para la conectorización del circuito con el equipo. Cabe recalcar que el equipo está calibrado a nivel de los cables con terminación N, sin embargo, la inserción tanto de pérdidas como de fase por los adaptadores no afectará en conjunto la apreciación de división de potencia a obtenerse ya que estas pérdidas son comunes en todos los puertos.



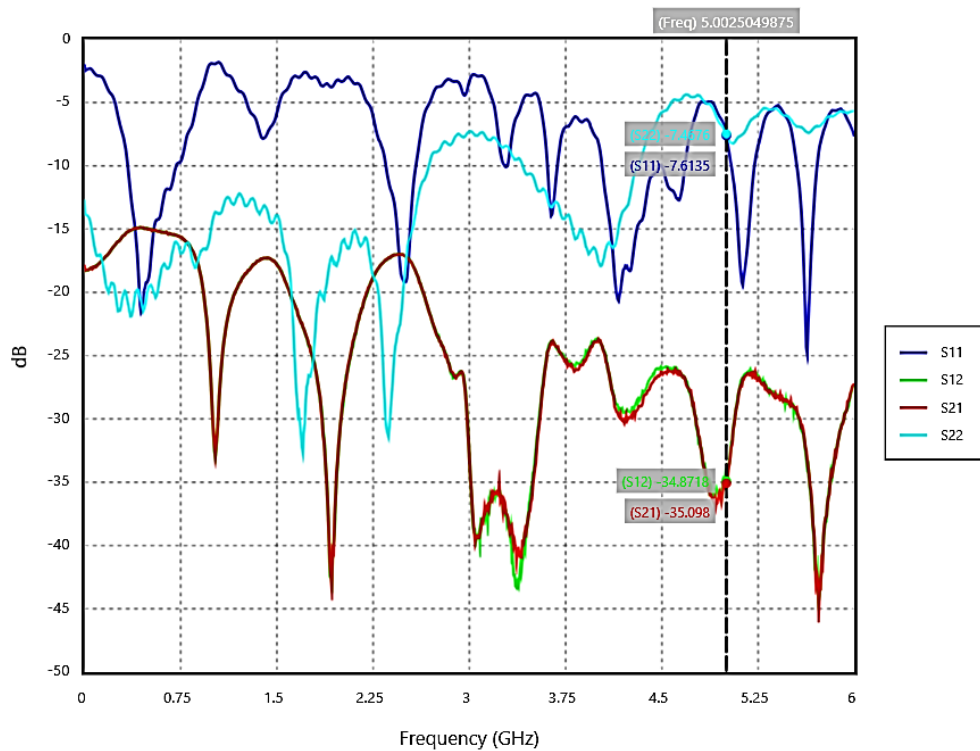
**Figura 2.15** Configuración para la medición del circuito con el analizador vectorial de redes.



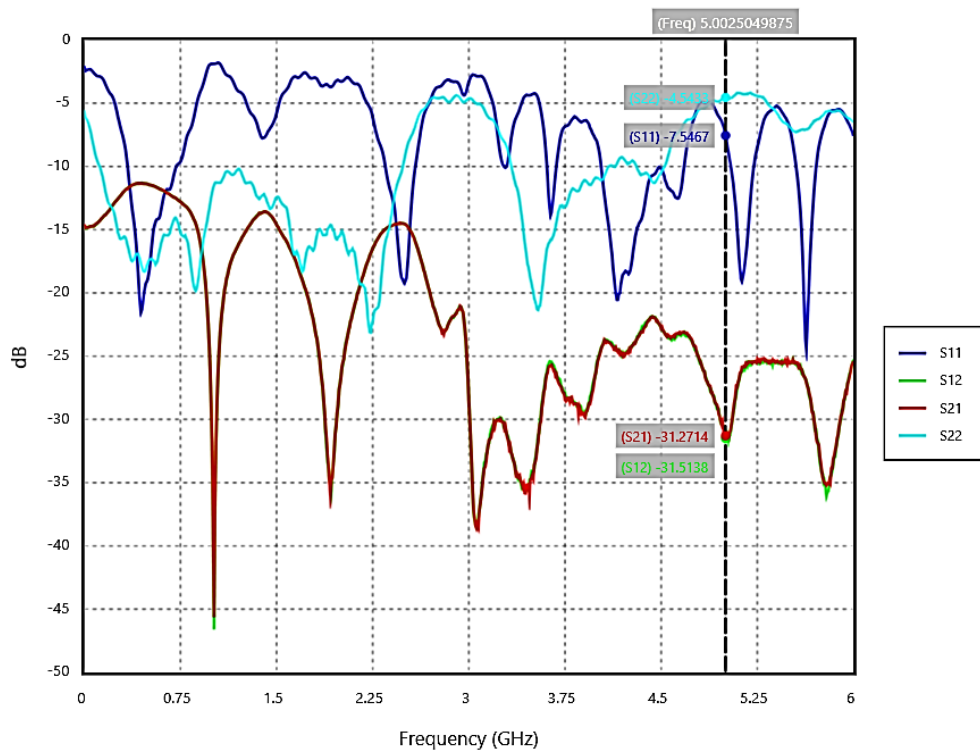
Una vez que se verifica la correcta conexión de todo se procede a realizar la medición de los 4 parámetros S correspondientes en el rango de 30 kHz a 6 GHz. Es importante mencionar que el equipo permite visualizar 4 gráficas independientes de manera simultánea para cada uno de los parámetros S

PARÁMETROS S DE CADA UNA DE LAS SALIDAS DE LA DISTRIBUCIÓN TRIANGULAR ENSAMBLADA

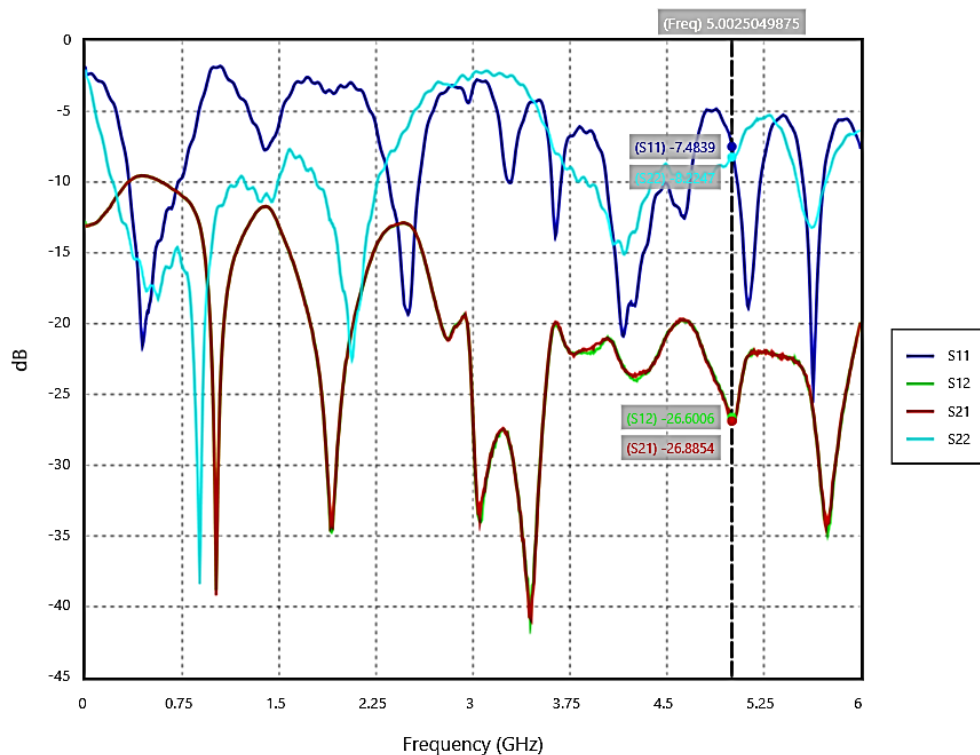
Las Figuras 2.16, 2.17, 2.18, 2.19 y 2.20 presentan las 5 gráficas que muestran los parámetros S para la distribución triangular en función de la frecuencia.



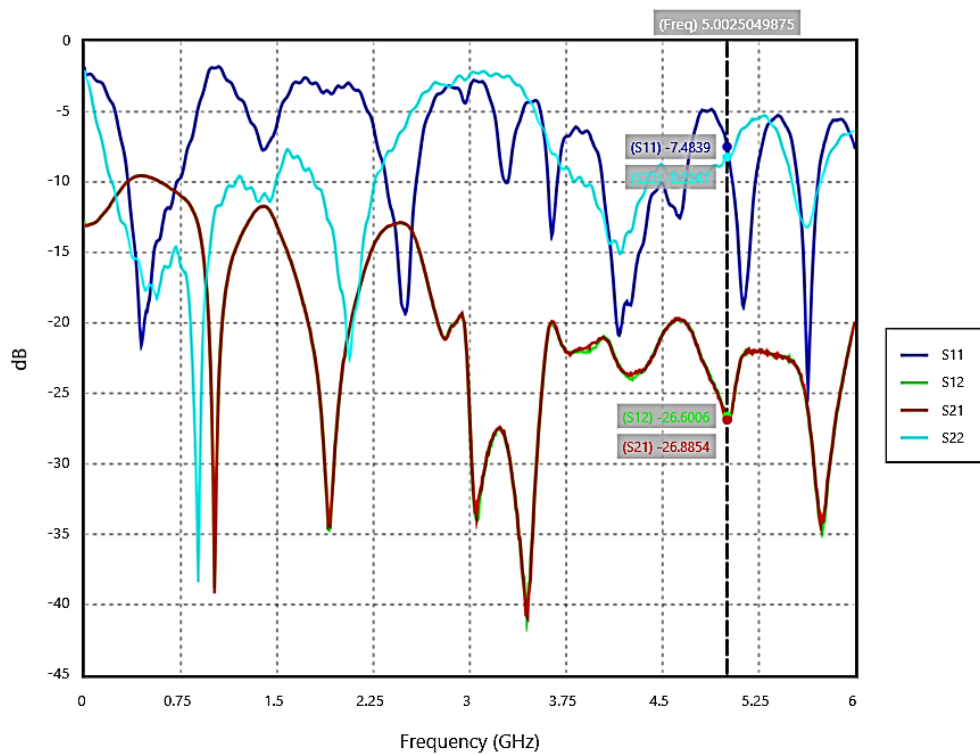
**Figura 2.16** Grafico de los Parámetros S para la Salida 1



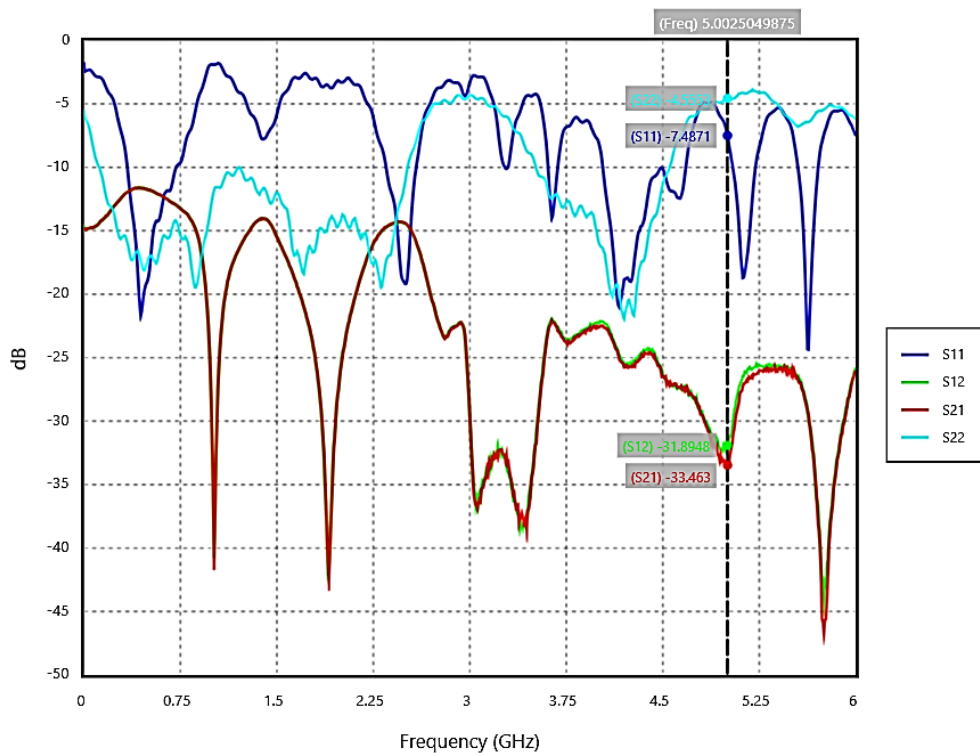
**Figura 2.17** Grafico de los Parámetros S para la Salida 2



**Figura 2.18** Grafico de los Parámetros S para la Salida 3



**Figura 2.19** Grafico de los Parámetros S para la Salida 4



**Figura 2.20** Grafico de los Parámetros S para la Salida 5

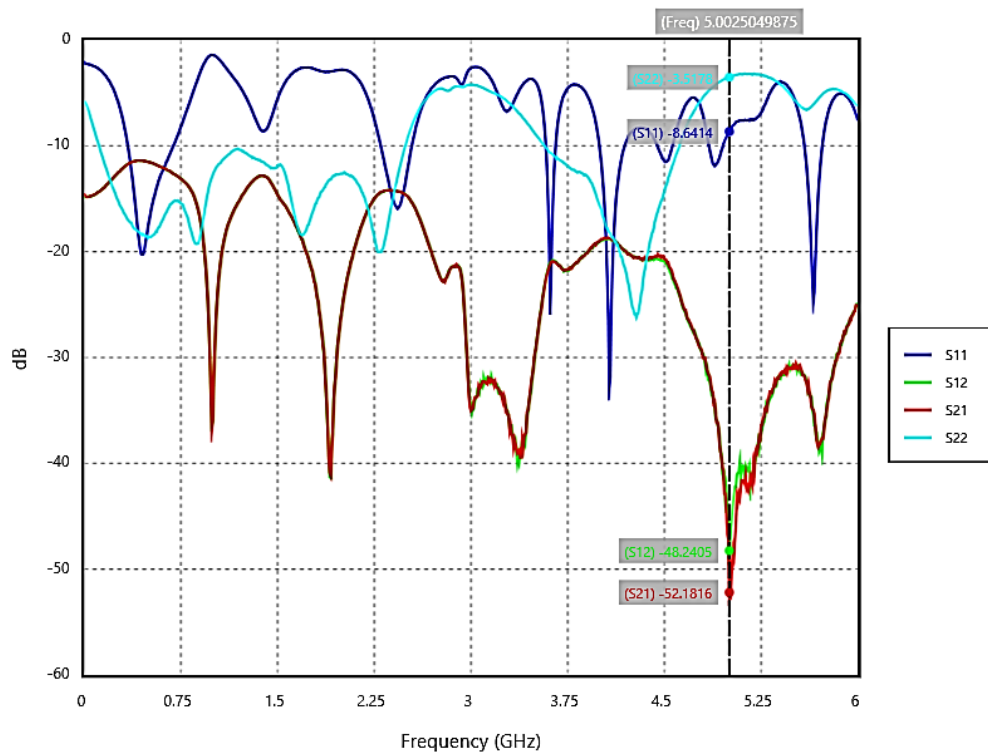
Una vez se ha recolectado todos los valores correspondientes a parámetros S de cada una de las salidas se procederá a colocar los mismos en la tabla 2.7 a fin de facilitar la apreciación de todos juntos.

**Tabla 2.7** Parámetros S distribución Triangular Ensamblada

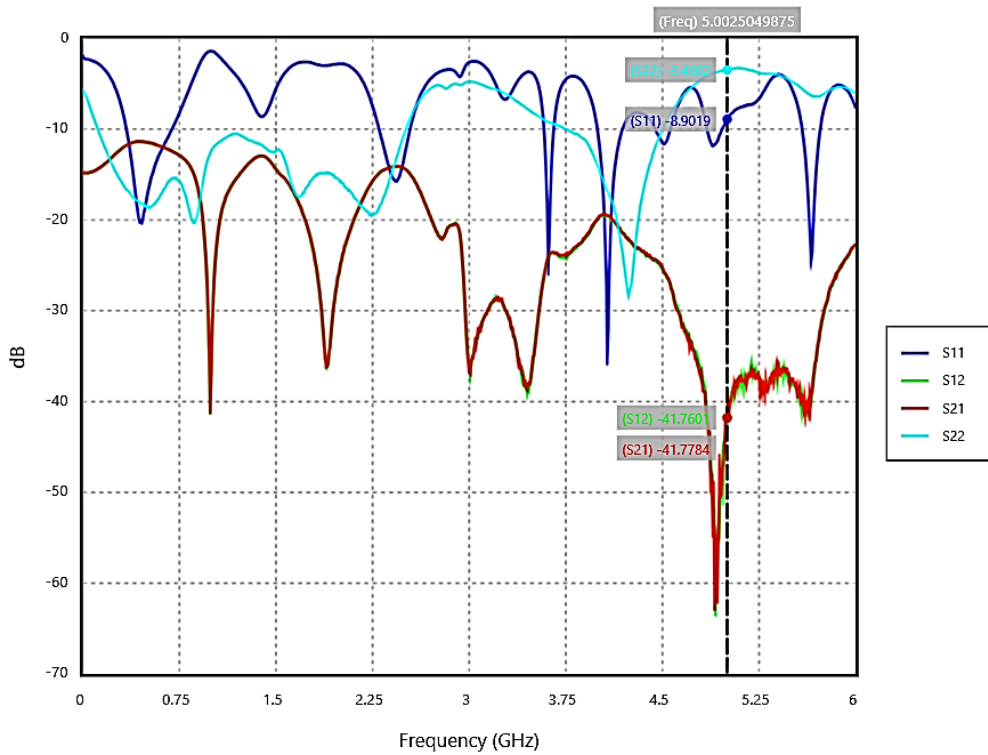
Sij	Salida 1	Salida 2	Salida 3	Salida 4	Salida 5
<b>S11</b>	-7,61	-7,55	-7,48	-7,54	-7,48
<b>S12</b>	-34,87	-32,80	-26,60	-31,51	-31,89
<b>S21</b>	-35,1	-32,73	-26,88	-31,27	-33,46
<b>S22</b>	-7,46	-4,86	-8,22	-4,54	-4,55

PARÁMETROS S DE CADA UNA DE LAS SALIDAS DE LA DISTRIBUCION BINOMIAL ENSAMBLADA

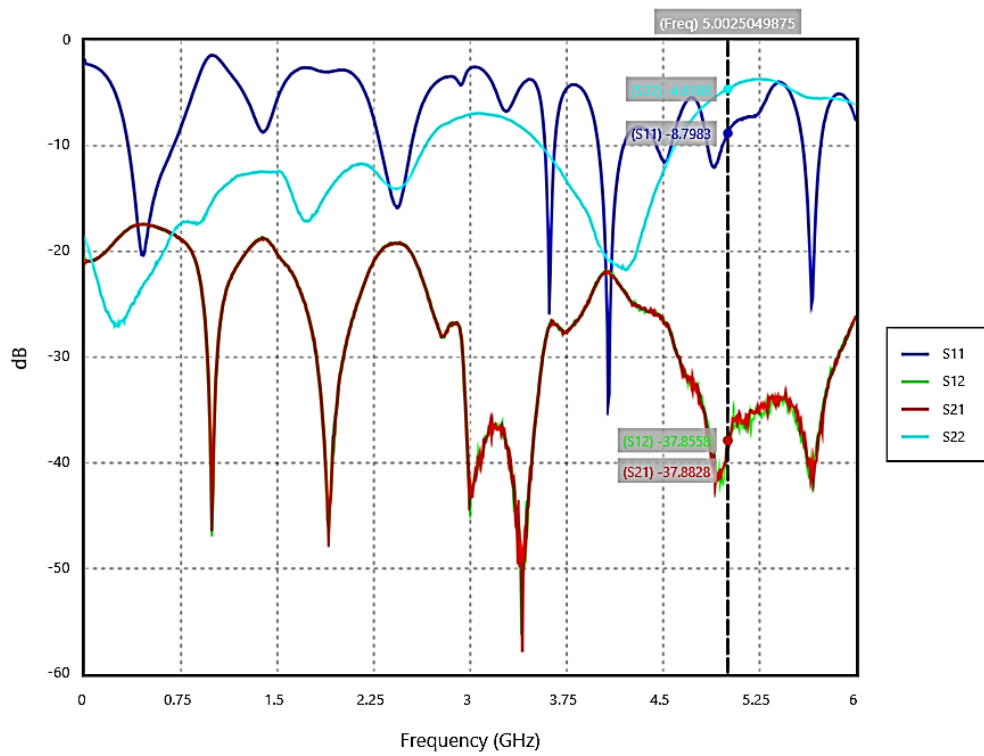
Las Figuras 2.21, 2.22, 2.23, 2.24 y 2.25 presentan las 5 gráficas que muestran los parámetros S para la distribución triangular en función de la frecuencia.



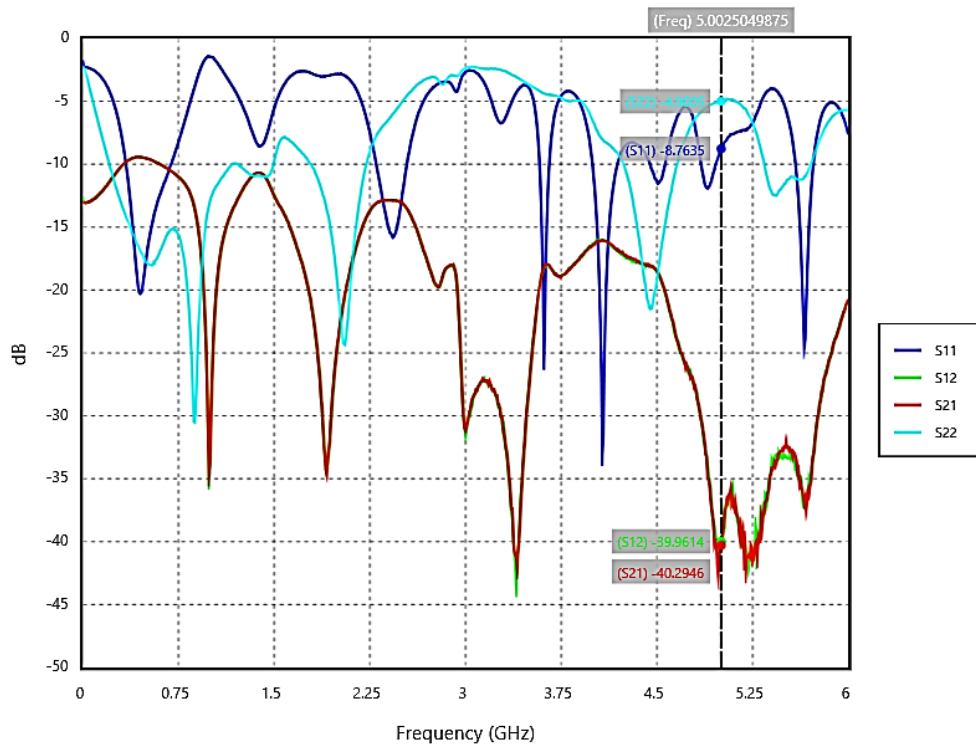
**Figura 2.21** Grafico de los Parámetros S para la Salida 1



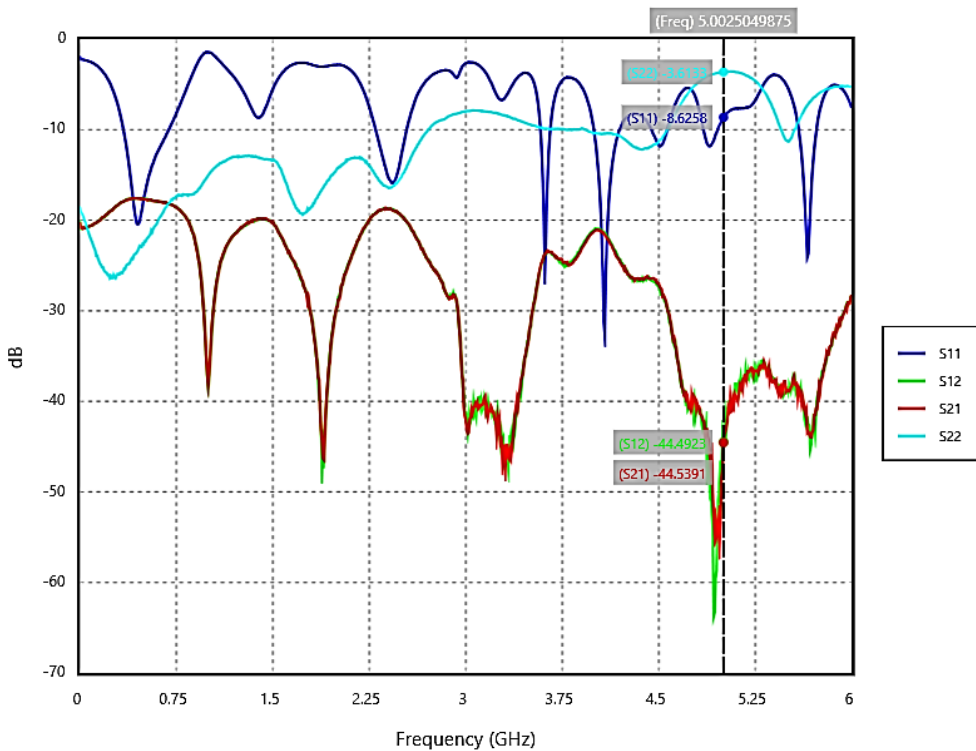
**Figura 2.22** Grafico de los Parámetros S para la Salida 2



**Figura 2.23** Grafico de los Parámetros S para la Salida 3



**Figura 2.24** Grafico de los Parámetros S para la Salida 4



**Figura 2.25** Grafico de los Parámetros S para la Salida 5

Una vez se ha recolectado todos los valores correspondientes a parámetros S de cada una de las salidas se procederá a colocar los mismos en la tabla 2.8 a fin de facilitar la apreciación de todos juntos.

**Tabla 2.8** Parámetros S distribución Binomial Ensamblada

<b>Sij</b>	<b>Salida 1</b>	<b>Salida 2</b>	<b>Salida 3</b>	<b>Salida 4</b>	<b>Salida 5</b>
<b>S11</b>	-8,64	-8,90	-8,8	-8,76	-8,63
<b>S12</b>	-48,24	-41,76	-37,86	-39,96	-44,49
<b>S21</b>	-52,18	-41,78	-37,88	-40,29	-44,54
<b>S22</b>	-3,52	-3,46	-4,62	-4,98	-3,61

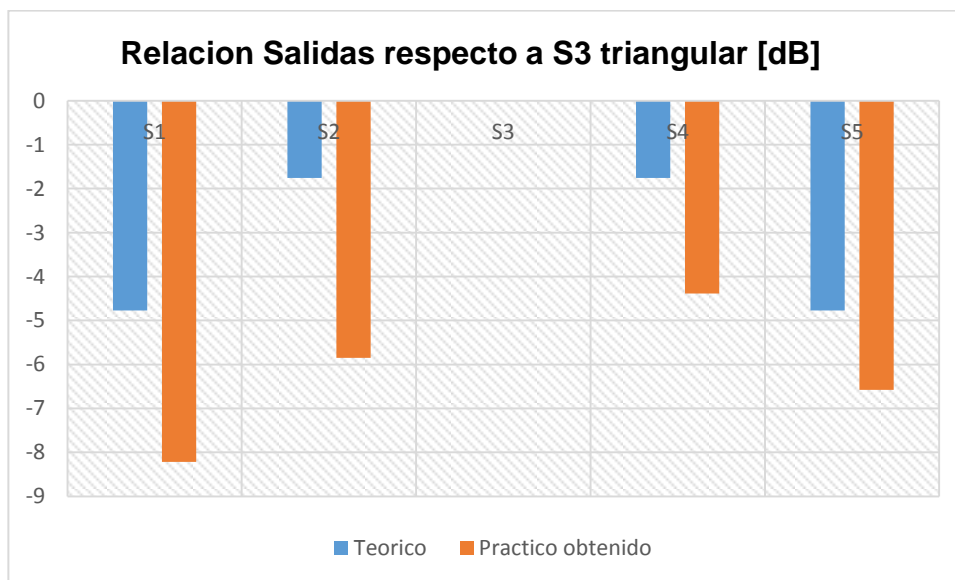
### 3 RESULTADOS, RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

Y

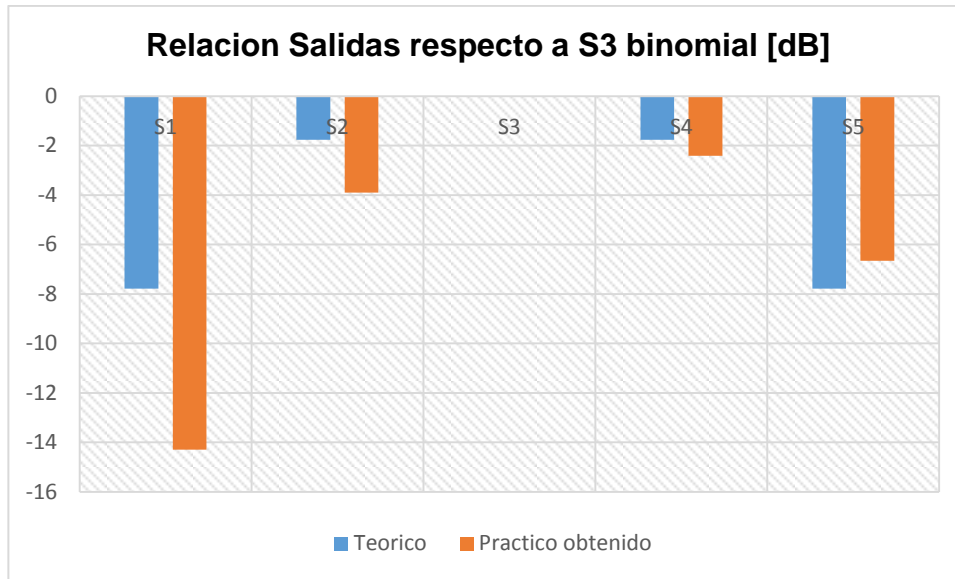
#### 3.1 RESULTADOS

Una vez que se ha realizado el proceso de medición, a continuación, se procede a comparar la relación de las Salidas con respecto a S3, ya que esta salida será la referencia pues idealmente no debería atenuarse. Dicha comparación se puede apreciar de mejor manera en las figuras 3.1 y 3.2 a continuación.



**Figura 3.1** Comparación Relaciones de salidas teóricas y prácticas distribución triangular





**Figura 3.2** Comparación Relaciones de salidas teóricas y prácticas distribución binomial

En los gráficos anteriores se puede apreciar una discrepancia entre los valores teóricos y los valores medidos, dicha diferencia se encuentra cuantificada a continuación en la Tabla 3.1

**Tabla 3.1** Diferencia entre las relaciones de salida teóricas y prácticas para las distribuciones

Distribución	Error Salida 1 [dB]	Error Salida 2 [dB]	Error Salida 3 [dB]	Error Salida 4 [dB]	Error Salida 5 [dB]
<b>Triangular</b>	-3,44	-4,09	-	-2,63	-1,81
<b>Binomial</b>	-6,52	-2,14	-	-0,65	1,12

## 3.2 CONCLUSIONES

El presente proyecto cumplió con el objetivo de diseñar e implementar dos circuitos de alimentación para cinco elementos para distribuciones Triangular y binomial de 5 elementos para una frecuencia de operación de 5 GHz.

Se pudo evidenciar todo el proceso de diseño para las placas en tecnología *microstrip* para el sustrato FR4. Además, fue necesaria la realización de ciertas correcciones a fin de conseguir resultados cercanos a los ideales pues, los valores calculados no existen comercialmente o no son físicamente implementables, por lo cual fue necesario trabajar con valores cercanos a los previamente calculados. Como efecto de lo anteriormente mencionado es evidente que existen ligeras diferencias entre lo que se esperaba obtener según la teoría comparado con los valores obtenidos mediante la simulación.

Ahora bien, las mediciones y análisis del apartado de la implementación en la realidad, tuvo una diferencia con respecto a los valores teóricos de diseño. Siendo la máxima diferencia con un valor de  $-6,52$  dB. Todo esto como resultado de diversos factores existentes durante la fabricación mismos que serán explicados a continuación.

Primeramente, el apartado de las líneas en tecnología *microstrip*, existen ciertas imperfecciones en la geometría de las líneas con lo cual no se cumplirán a cabalidad los parámetros requeridos.

El siguiente factor son la tolerancia que presentan las resistencias SMD que para este caso al ser de 3 cifras se trabajara con una tolerancia del 5% con respecto al valor marcado, a esto se debe agregar la diferencia entre el valor comercial calculado de cada resistencia y el valor que es posible encontrar en el mercado.

También es importante considerar dos factores en conjunto que están estrechamente relacionados, estos son la transición de *microstrip* a coaxial al momento de colocar los conectores, y el segundo factor es la soldadura, pues este proyecto presento ciertas dificultades al no contar con equipos profesionales.

Todos estos factores son la razón para que exista una diferencia entre los valores teóricos y los medidos. Por lo cual, a pesar de existir errores, se considera que los mismos como aceptables ya que fueron producidos en base a los inconvenientes propios de implementación.

Finalmente, con todo lo previamente expuesto se puede considerar que el presente proyecto ha cumplido con el objetivo general, así mismo consiguió cumplir con todos

objetivos planteados para el presente proyecto. Pudiendo ser considerado como una guía sencilla para futuras implementaciones con un enfoque similar.

### **3.3 RECOMENDACIONES**

Después de la realización de este proyecto existen una ciertas de recomendaciones importantes a tomarse en cuenta en caso de realizar un proyecto con un enfoque similar y se desee obtener mejores resultados. Las mismas están basadas en reducir o eliminar los pequeños errores que se evidencian en este proyecto.

Para obtener mejores resultados es recomendable que el proceso de fabricación de las placas sea realizado de manera más profesional, en un lugar que cuente con maquinaria que proporcione mejores resultados al trabajar en tecnología *microstrip*.

De la mano con esto puede llegar a ser útil el uso de resistencias SMD de 4 cifras pues las mismas poseen una tolerancia de solo 1%.

Además, a fin de reducir la cantidad de pérdidas es sumamente recomendable el uso de otras técnicas y equipos de soldadura que proporcionen acabados con una calidad superior.

Si se toman en cuenta estas recomendaciones se puede garantizar que los resultados serán superiores y en caso de existir errores los mismos serán insignificantes.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. D. Kraus and R. J. Marhefka, Antennas for all applications, 3rd ed. Boston: McGraw-Hill, 2003.
- [2] C. A. Balanis, Antenna theory: analysis and design, 3rd ed. NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [3] Á. Cardama, A. Lluís, J. Roca, J. Manuel, R. Casals, J. Romeu, R. Sebastián, B. Boris, and M. F. Bataller, Antenas EDICIONS UPC, vol. 2. 2002.
- [4] N. Shinohara, B. Shishkov, H. Matsumoto, K. Hashimoto, and A. K. M. Baki, "New stochastic algorithm for optimization of both side lobes and grating lobes in large antenna arrays for MPT," IEICE Transactions on Communications, vol. E91-B, no. 1, 2008, doi: 10.1093/ietcom/e91-b.1.286.
- [5] I. J. Gupta and A. A. Ksienski, "Effect of Mutual Coupling on the Performance of Adaptive Arrays," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 31, no. 5, 1983, doi: 10.1109/TAP.1983.1143128
- [6] R. Sorrentino y G. Bianchi, Microwave and RF Engineering, West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
- [7] D. Pózar, Microwave Engineering, Amherst: JohnWiley & Sons, Inc., 2011.
- [8] P. Chow and D. Davies, "Wide bandwidth Butler matrix network," Electronics Letters, vol. 3, no. 6, pp. 252-253, 1967.
- [9] KF5OBS, Dirección, KF5OBS #28: Wilkinson Splitter / Combiner Basics. [Película]. Alemania: Youtube, 2014.
- [10] Universitat Politècnica de València – UPV: Distribución triangular | | UPV [Video clase]  
Valencia: Youtube, 2017.

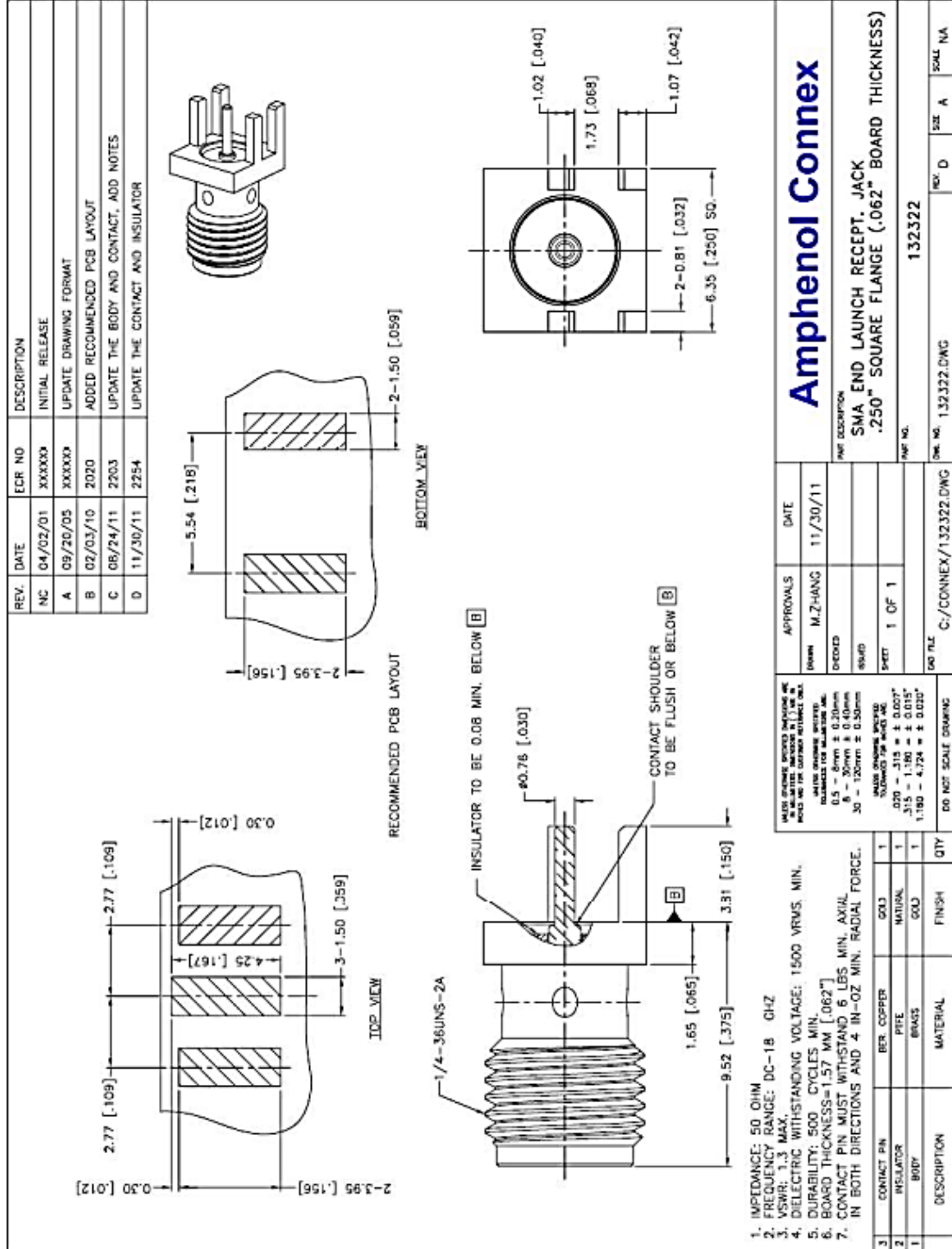
# **ANEXOS**

ANEXO I. Datasheet SMA

ANEXO II. Datasheet VNA N9916A

# ANEXO I

## Datasheet SMA





# Keysight Technologies FieldFox Handheld Analyzers

## Selection Guide

Choose the FieldFox that meets your needs

### RF and microwave (combination) analyzers

Standard: Cable and antenna tester (CAT)<sup>1</sup>

Key options (prices vary):

- Vector network analyzer
- Spectrum analyzer
- Built-in power meter
- Pulse measurements
- Channel scanner
- Real-time spectrum analyzer

### RF and microwave vector network analyzers (VNAs)

Standard: Transmission/reflection VNA

Key options (prices vary):

- Built-in power meter
- Pulse measurements

### Microwave spectrum analyzers (SAs)

Standard: Spectrum analyzer

Key options (prices vary):

- Built-in power meter
- Pulse measurements
- Channel scanner
- Real-time spectrum analyzer



Select your model and frequency

## ANEXO II



Combination models (CAT + VNA + SA)				
Maximum frequency	VNA models			SA models
4 GHz	N9912A-104	N9913A	N9923A-104	-
6/6.5 GHz	N9912A-106 <sup>2</sup>	N9914A <sup>3</sup>	N9923A-106 <sup>2</sup>	-
9 GHz	-	N9915A	-	N9925A N9935A
14 GHz	-	N9916A	-	N9926A N9936A
18 GHz	-	N9917A	-	N9927A N9937A
26.5 GHz	-	N9918A	-	N9928A N9938A
32 GHz	-	N9950A	-	N9960A
44 GHz	-	N9951A	-	N9961A
50 GHz	-	N9952A	-	N9962A
Start frequencies				
N991x/2x/3x				
CAT/VNA mode	2 MHz	30 kHz	2 MHz	30 kHz
SA mode	100 kHz	100 kHz	-	100 kHz
N995x/6x				
CAT/VNA mode	-	300 kHz	-	-
SA mode	-	9 kHz	-	9 kHz

1. Also referred to as cable and antenna analyzer
2. Maximum frequency is 6 GHz.
3. Maximum frequency is 6.5 GHz



Unlocking Measurement Insights

## Customize your FieldFox and choose the options you want

Options must be ordered separately.  
Prices vary based on option and analyzer.

	RF combination	Microwave combination	RF VNA	Microwave VNA	Microwave SA
	N9912A	N9913A, N9914A N9915A, N9916A N9917A, N9918A N9950A, N9951A N9952A <sup>1</sup>	N9923A	N9925A, N9926A N9927A, N9928A	N9935A, N9936A N9937A, N9938A N9960A, N9961A N9962A <sup>1</sup>
<b>CAT/VNA features</b>					
Cable and antenna tester	√	√	√	√	Subset <sup>2</sup>
TDR cable measurements	-	√	-	√	-
VNA transmission/reflection	Subset <sup>3</sup>	√	√	√	-
VNA full 2-port S-parameters	-	√	√	√	-
QuickCal	√ <sup>4</sup>	√ <sup>5</sup>	√	√	-
1-port mixed-mode S-parameters	-	√	√	√	-
VNA time domain	√	√	√	√	-
Vector voltmeter	Subset <sup>6</sup>	√	√	√	-
<b>SA features</b>					
Spectrum analyzer	√	√	-	-	√
Tracking generator	√	√	-	-	√
Preamplifier	√	√	-	-	√
Interference analyzer <sup>7</sup>	√	√	-	-	√
SA time gating	-	√	-	-	√
Channel scanner	√	√	-	-	√
Analog demodulation	-	√	-	-	√
ERTA <sup>8</sup>	-	√	-	-	√
Real-time spectrum analyzer (RTSA) <sup>9</sup>	-	√	-	-	√

Power measurements		
USB power sensor support	✓	✓
USB sensor meas. vs. freq.	✓	✓
Pulse meas. with peak sensor	✓	✓
Built-in power meter	✓	✓
System features		
Remote control capability	✓	✓
GPS receiver	External only <sup>10</sup>	External only <sup>10</sup>
DC bias voltage source	-	-
SCPI over LAN and USB <sup>11</sup>	✓	✓

1. In most frequency ranges, the N995xA/6xA models have the highest dynamic range, most stability and best DANL. Measurement accuracy is comparable between the models. The Data Sheet can be used for a more detailed comparison (5990-9783EN).
2. N993xA/6xA (SA only models) offer the ability to measure VSWR/reflection (as an option), but not the full CAT features.
3. N9912A offers S11 mag and phase and S21 mag. There is no S21 phase. Calibration choices: OSL, response and QuickCal.
4. N9912A's QuickCal is a subset of the QuickCal available on other FieldFox models.
5. QuickCal is not available on N995xA models.
6. N9912A's VVM includes a subset of the features: 1-port cable trimming mag and phase, and 2-port transmission mag. The full VVM (available on other models) includes 1-port cable trimming mag and phase, 2-port transmission mag and phase, A/B and B/A.
7. FieldFox's interference analyzer capability includes spectrogram, waterfall, and trace playback and recording.
8. ERTA: Extended range transmission analysis. ERTA enables scalar transmission measurement of long cables using two FieldFoxes.
9. RTSA capability for N991xA/3xA is only available for serial number prefix starting with MY5607/US5607 or upgraded with Option N9910HU-100/200/300.
10. N9912A and N9923A can display GPS information using an external USB GPS receiver which the user needs to purchase separately. All other FieldFox models have a built-in GPS receiver, available as Option 307. The user will need to purchase a GPS antenna N9910X-825
11. SCPI over USB is only available for FieldFox with serial number prefix starting with MY5507/US5507 or upgraded with Option N9910HU-x1x

www.keysight.com/find/fieldfox  
 This information is subject to change without notice.  
 © Keysight Technologies 2015-2017  
 Published in USA, February 10, 2017  
 5992-1016EN  
 www.keysight.com



Unlocking Measurement Insights