

An Efficient 2.4 GHz Six-port Circuit Design to implement a Reflectometer

G. Hernández-Veliz, *Student Member, IEEE*, F. A. Uribe, *Senior Member, IEEE*,
and C. A. Bonilla-Barragán

Abstract—An efficient and simple design of a 2.4 GHz six-port circuit for a reflectometer is analyzed and presented. This circuit matches with the ideal q -points symmetrical distribution of the Engen's criteria, implemented with only two microstrip power dividers. The first is a 90° directional hybrid coupler and the second is a symmetrical five-port junction. This six-port configuration has a single sided microstrip structure formed with basic regular geometric figures, avoiding the use of additional elements into the circuit. The design and theoretical basis here presented, simplifies the process of implementing a six-port reflectometer, as a great alternative for measuring high frequency signals. The six-port design is an intricate technical task for those who want to implement this measuring instrument.

Index Terms—Reflection coefficient measurement, six-port circuit, six-port reflectometer, six-port measurement technique, microstrip coupler

I. INTRODUCCIÓN

Una de las opciones para la medición de la impedancia compleja de circuitos o dispositivos que operan a las frecuencias de microondas es el reflectómetro hexaportal. Este equipo de medición obtiene el valor del coeficiente de reflexión del dispositivo bajo prueba (Γ_{DBP}) mediante mediciones escalares de potencias. Esto se logra a partir de cuatro mediciones de potencia en cuatro de los seis puertos de la red pasiva del reflectómetro [1]. Un reflectómetro hexaportal está formado por un generador de señal y cuatro diodos detectores de potencia de microondas, interconectados entre sí a través de un circuito de seis puertos o red hexaportal (generalmente en microcinta) el cual tiene un puerto de medición para el DBP (Dispositivo Bajo Prueba), además de una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) y un equipo de cómputo (PC o placa de desarrollo). El diagrama de un reflectómetro hexaportal se muestra en la Fig. 1. Este equipo de medición no solo se emplea como una alternativa al VNA comercial (Vector Network Analyzer) [2] o como equipo de medición de circuitos experimentales de radiofrecuencia [3], sino que también, debido a su alta capacidad de adaptabilidad y a la sencillez de sus componentes, es muy atractivo para diversas áreas de investigación de las microondas. Por ejemplo, en sistemas de radar [4], [5], la caracterización de ciertas propiedades de algunos materiales [6], [7], [8], [9], [10] y aplicaciones biomédicas [11], [12], [13], [14], entre otras.

El diseño de la red de seis puertos es de vital importancia para el correcto funcionamiento del reflectómetro. Debido a que, de las características físicas y eléctricas de la red, dependen directamente las ubicaciones de los centros de tres círculos dentro del plano complejo Γ [15]. Estos tres centros

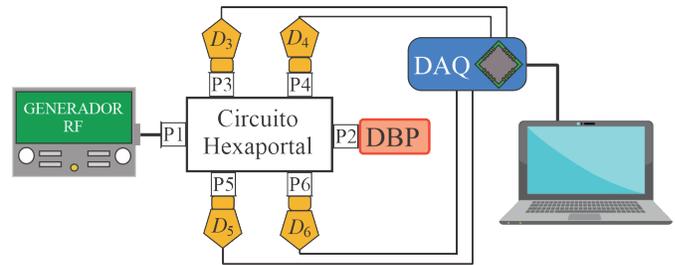


Fig. 1. Diagrama del reflectómetro hexaportal. En el cual se muestra el generador de RF (radiofrecuencia), los diodos detectores (D_i), el circuito hexaportal, el DBP (Dispositivo Bajo Prueba), la tarjeta DAQ (Adquisición de Datos) y el equipo de cómputo.

o puntos q_i (q_3 , q_5 y q_6) forman parte del modelo general de la reflectometría hexaportal [16]. Además, los radios de los círculos toman sus valores en función de las relaciones de potencias P_i (P_3 , P_4 , P_5 y P_6) medidas por los diodos detectores D_i (D_3 , D_4 , D_5 y D_6). De tal manera que, la medición del Γ_{DBP} se resuelve de manera geométrica, tomando el valor correspondiente al punto del plano en el que se interceptan los tres círculos (trilateración). La importancia del diseño del circuito hexaportal radica en que, mientras más se aleje de una distribución equidistante de los puntos q en el plano Γ , se incrementa la incertidumbre en la medición [17] [18]. Una distribución equidistante o ideal de los puntos q es conocida como, el criterio de Engen [1].

Se han propuesto algunos diseños alternativos del circuito de seis puertos, por ejemplo, en [19] y [20] se utilizan acopladores y líneas modificadas para aumentar el ancho de banda. Otros mejoran la distribución de potencia para lograr una mayor precisión en la medición [17], mientras que algunos no requieren el uso de diodos acoplados [21]. No obstante, algunas de estas propuestas pueden resultar en diseños con más de dos acopladores direccionales o con elementos dentro del circuito, como resistores y diseños de más de dos capas en el sustrato. Pudiendo esto representar un reto técnico al implementar el circuito. En ocasiones debido a la falta de sustento teórico del diseño, por estar conformado por figuras irregulares, geometrías de doble cara o sin la opción de ser trasladables en frecuencia. En este artículo, presentamos el diseño de un circuito hexaportal implementado con solo dos acopladores direccionales, en un circuito de microcinta de una sola cara, con los datos necesarios para su implementación (secciones de línea de transmisión, análisis de puertos y parámetros S) y que cumple con una distribución equidistante

de sus puntos q , como lo describe el criterio de Engen.

Este circuito de seis puertos es una variante de [22], en donde un acoplador híbrido de 90° es utilizado como acoplador direccional de dos vías, en conjunto con un acoplador simétrico de cinco puertos, como se observa en la Fig. 2. Consiguiendo con esto un circuito en microcinta de una sola cara y sin elementos adicionales dentro del circuito como resistores. Además, se proporcionan los datos necesarios para ser replicado e incluso trasladado en frecuencia si es necesario (siempre y cuando las características del sustrato a utilizar lo permitan). Adicionalmente, demostramos teóricamente que incluso con esta configuración de dos acopladores direccionales, el circuito mantiene una distribución equidistante en sus puntos q y una distribución de potencia (parámetros S) acorde con el modelo teórico. Aunque este diseño no presenta un ancho de banda amplio, por sus demás características mencionadas, sigue siendo una gran alternativa para quien desee implementar de manera simple y eficiente un reflectómetro hexaportal. Por ejemplo, para utilizarse como alternativa al VNA comercial u otras aplicaciones, sobre todo en laboratorios no especializados, en donde no es fácil disponer de equipos VNA debido a sus altos costos y mucho menos modificarlos y adecuarlos para determinadas aplicaciones.

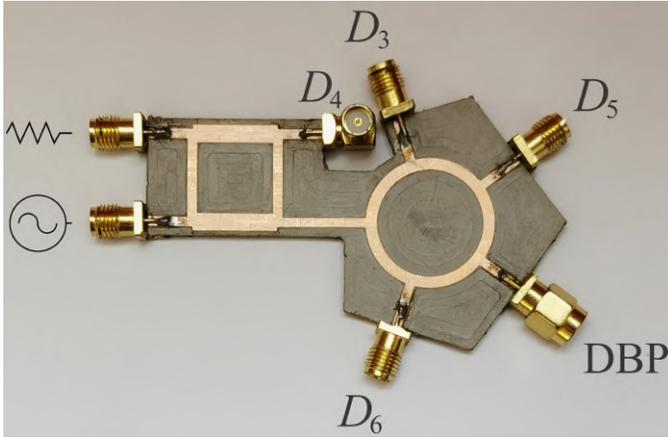


Fig. 2. Circuito de seis puertos (red hexaportal) en microcinta, formado por un acoplador híbrido de 90° y un acoplador simétrico de cinco puertos.

En la sección II se muestra una breve introducción al modelo general de la reflectometría hexaportal, así como el análisis teórico y de centros q de la estructura presentada. En la sección III se muestran los resultados de los parámetros S del circuito, tanto simulados como medidos. Finalmente, en la sección IV se analizan los resultados, discutiendo si son o no aptos para reflectometría, con sus ventajas y desventajas frente a otros circuitos hexaportales.

II. EL REFLECTÓMETRO HEXAPORTAL

Un reflectómetro hexaportal es un dispositivo que, mediante mediciones escalares de potencia en cuatro de sus seis puertos (P3, P4, P5 y P6) es capaz de obtener una medición vectorial del coeficiente de reflexión del DBP (Γ_{DBP}) conectado en su puerto de prueba P2 [1]. En la Fig. 3 se ve la imagen

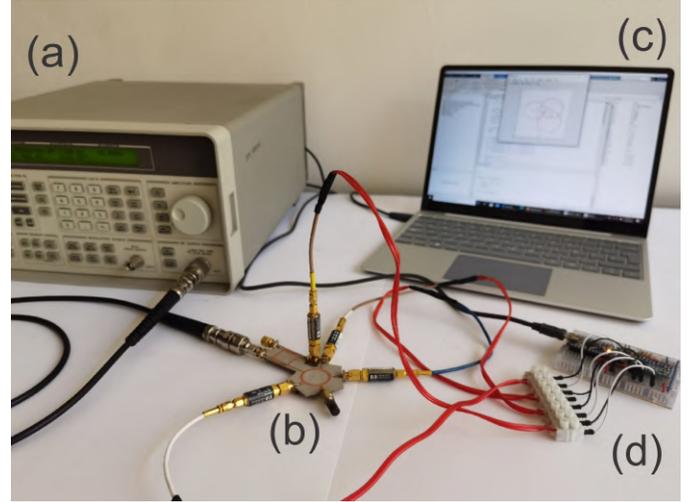


Fig. 3. Reflectómetro hexaportal implementado con el circuito propuesto, donde se ve el generador (a), el circuito hexaportal con los diodos detectores (b), el equipo de cómputo (c) y la tarjeta de adquisición de datos (DAQ) (d).

de un reflectómetro hexaportal implementado con el circuito propuesto.

Para obtener el Γ_{DBP} se utiliza el modelo matemático representado por el conjunto de ecuaciones (1), con el cual el problema se resuelve de manera geométrica, como se muestra en la Fig. 4. El valor del Γ_{DBP} corresponde con el punto de intersección de los tres círculos en el plano complejo Γ . Los radios de los tres círculos toman su valor en función de las relaciones de potencias (P_i/P_4) medidas por los cuatro diodos detectores (D_i). Las ubicaciones de los centros de los círculos (puntos q) en el plano, se obtienen en función de las características de la red hexaportal, siempre considerando que, mientras más se aleje de una distribución equidistante de los puntos q en el plano, la incertidumbre en la medición del Γ_{DBP} aumenta [15]. La recomendación de una separación angular de los puntos q de 120° entre sí y algunas otras recomendaciones para reducir la incertidumbre en la medición del Γ_{DBP} , son mencionadas en [16].

Al desarrollar el modelo de los parámetros de dispersión del circuito hexaportal, de la forma $b = S \cdot a$ y después de haber realizado una serie de sustituciones algebraicas [1], [2], se obtienen el conjunto de ecuaciones (1). En las que los parámetros A , B , D , E , F , H y G toman su valor en función de las características físicas y eléctricas de la red hexaportal y un vez obtenidos permanecen constantes.

$$b_3 = Aa_2 + Bb_2 = Ab_2 \left(\Gamma_2 + \frac{B}{A} \right), \quad (1a)$$

$$b_4 = Ca_2 + Db_2 = Cb_2 \left(\Gamma_2 + \frac{D}{C} \right), \quad (1b)$$

$$b_5 = Ea_2 + Fb_2 = Eb_2 \left(\Gamma_2 + \frac{F}{E} \right), \quad (1c)$$

$$b_6 = Ga_2 + Hb_2 = Gb_2 \left(\Gamma_2 + \frac{H}{G} \right). \quad (1d)$$

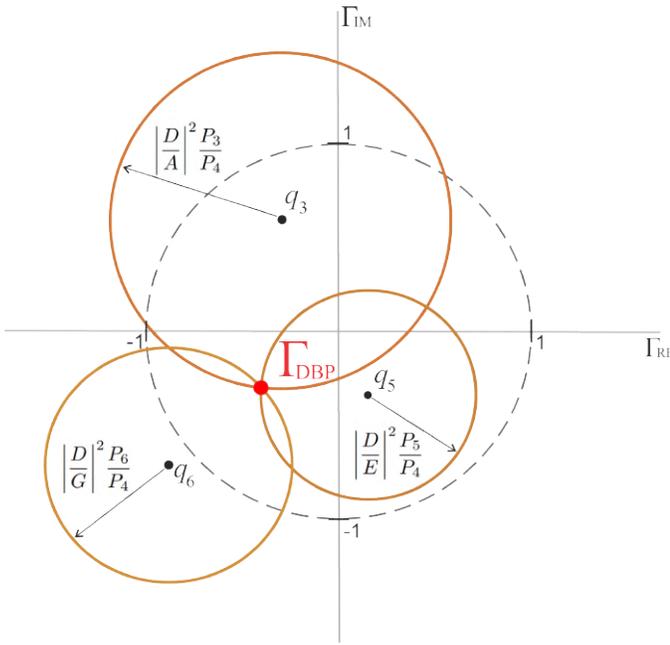


Fig. 4. Ejemplo de la solución gráfica del Γ_{DBP} , mediante la intersección de los tres círculos en el plano complejo Γ con la técnica de la reflectometría hexaportal.

A partir de las ecuaciones (1), se desarrollan tres expresiones de la forma $(x - h)^2 + (y - k)^2 = r^2$. Cada una de ellas describe a uno de los tres círculos, con su respectivo centro y radio dentro del plano complejo Γ . Mediante las cuales se obtiene el $\Gamma_{DBP} = \Gamma_2$, [1]. Las variables P_3 , P_4 , P_5 , y P_6 corresponden a las lecturas de potencia de los diodos detectores en los puertos P3, P4, P5 y P6.

$$|\Gamma_2 - q_3|^2 = \left| \frac{D}{A} \right|^2 \frac{P_3}{P_4}, \quad (2a)$$

$$|\Gamma_2 - q_5|^2 = \left| \frac{D}{E} \right|^2 \frac{P_5}{P_4}, \quad (2b)$$

$$|\Gamma_2 - q_6|^2 = \left| \frac{D}{G} \right|^2 \frac{P_6}{P_4}, \quad (2c)$$

donde

$$q_3 = -\frac{B}{A}, \quad q_5 = -\frac{F}{E}, \quad q_6 = -\frac{H}{G}. \quad (3)$$

Posteriormente, se realiza un análisis de puertos como se aprecia en la Fig. 5, esto con la finalidad de conocer las ubicaciones de los puntos q de la estructura propuesta.

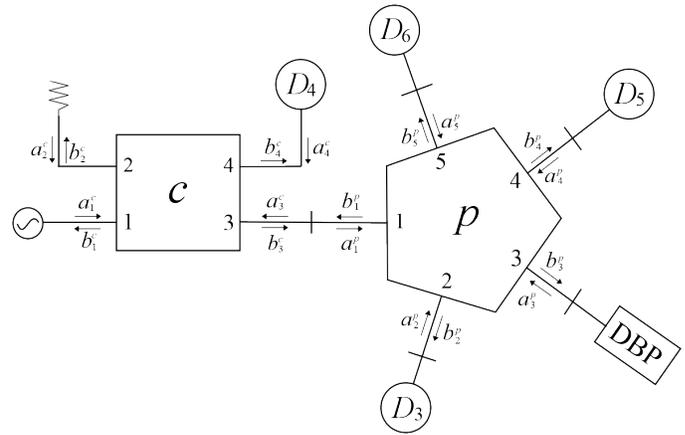


Fig. 5. Señales incidentes (a_i) y reflejadas (b_i) empleadas para el análisis del circuito, conformado por el acoplador híbrido de 90° (c) y el acoplador simétrico de cinco puertos (p).

En este análisis se obtiene una serie de equivalencias de las señales del sistema $b = S \cdot a$, con base en las matrices de dispersión de ambos acopladores que forman el circuito [23], [24]. En este circuito se considera una conexión perfecta entre ambos separadores y en los puertos correspondientes a los diodos detectores y el generador. Para calcular los valores de la estructura propuesta y por consecuencia la ubicación de sus puntos q , estas equivalencias obtenidas se llevan a la misma forma de cómo se presentan las ecuaciones del modelo general de la reflectometría (1), quedando como

$$b_3^c = \tau a_1^p + \tau a_3^p = \tau \frac{b}{\mu} + \tau (b\Gamma_2) = \tau b \left(\Gamma_2 + \frac{1}{\mu} \right), \quad (4a)$$

$$b_4^p = \mu a_1^p + \tau a_3^p = b + \tau b\Gamma_2 = \tau b \left(\Gamma_2 + \frac{1}{\tau} \right), \quad (4b)$$

$$b_5^p = \tau a_1^p + \mu a_3^p = \tau \frac{b}{\mu} + \mu b\Gamma_2 = \mu b \left(\Gamma_2 + \frac{\tau}{\mu^2} \right). \quad (4c)$$

Para continuar con el análisis se realiza un cambio en la nomenclatura de los puertos del circuito, para trasladar de la nomenclatura utilizada en el análisis de puertos de la Fig. 5, a la previamente empleada como aparece en la Fig. 2, de tal manera considerando lo siguiente:

$$a_3^p = a_2 = b_2\Gamma_{DBP}, \quad (5a)$$

$$b_3^p = b_2 = \mu a_1^p, \quad (5b)$$

$$\frac{a_2}{b_2} = \Gamma_{DBP} = \Gamma_2. \quad (5c)$$

donde

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2}} \angle 180^\circ, \quad \varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2}} \angle 270^\circ, \quad \mu = \frac{1}{2} \angle 120^\circ, \quad \tau = \frac{1}{2} \angle 120^\circ.$$

Al realizar las igualdades entre las ecuaciones del circuito hexaportal analizado (4) con las ecuaciones del modelo general

(1), resulta:

$$\tau b \left(\Gamma_2 + \frac{1}{\mu} \right) = Ab_2 \left(\Gamma_{DBP} + \frac{B}{A} \right), \quad (6a)$$

$$\tau b \left(\Gamma_2 + \frac{1}{\tau} \right) = Eb_2 \left(\Gamma_{DBP} + \frac{F}{E} \right), \quad (6b)$$

$$\mu b \left(\Gamma_2 + \frac{\tau}{\mu^2} \right) = Gb_2 \left(\Gamma_{DBP} + \frac{H}{G} \right), \quad (6c)$$

$$Ca_2 + Db_2 = \frac{\varepsilon}{\delta\mu} b = Cb_2 \left(\Gamma_{DBP} + \frac{D}{C} \right). \quad (6d)$$

De las equivalencias en (6), se derivan los valores para las variables de la estructura, que son:

$$\frac{B}{A} = \frac{1}{\mu} \rightarrow \frac{B}{A} = \frac{B}{\tau} = \frac{1}{\mu}, \quad (7a)$$

$$\frac{H}{G} = \frac{\tau}{\mu^2} \rightarrow \frac{H}{G} = \frac{\tau}{\mu^2}, \quad (7b)$$

por consiguiente

$$A = \tau, \quad D = \frac{\tau}{\mu}, \quad C = 0, \quad E = \tau, \quad (8a)$$

$$G = \mu, \quad B = \frac{\tau}{\mu}, \quad H = \frac{\tau}{\mu}. \quad (8b)$$

Ahora, con los valores de las constantes, se pueden conocer las ubicaciones de los tres puntos q_i del circuito, que son:

$$q_3 = -\frac{B}{A} = -\frac{1}{\mu} = \frac{1 \angle 180^\circ}{0,5 \angle -120^\circ}, \quad (9a)$$

$$q_5 = -\frac{F}{E} = -\frac{1}{\tau} = \frac{1 \angle 180^\circ}{0,5 \angle 120^\circ}, \quad (9b)$$

$$q_6 = -\frac{H}{G} = -\frac{\tau}{\mu^2} = \frac{0,5 \angle 300^\circ}{0,25 \angle -240^\circ}. \quad (9c)$$

Finalmente

$$q_3 = 2 \angle -60^\circ, \quad (10a)$$

$$q_5 = 2 \angle 60^\circ, \quad (10b)$$

$$q_6 = 2 \angle 180^\circ. \quad (10c)$$

Lo cual demuestra teóricamente la distribución de los puntos q de la red hexaportal propuesta, como se ve en la Fig. 2. Debido a que presenta una distribución equidistante en sus puntos q , con una separación de 120° entre sí, tal como lo describe el criterio de Engen [1].

La distribución de los centros q de la estructura propuesta en este artículo se muestra en la Fig. 6, en la cual se simula de manera ilustrativa la medición de una carga acoplada como DBP.

Al implementar el reflectómetro, el generador y los diodos detectores deben cubrir el ancho de banda de la red hexaportal implementada, con una potencia de entrada del generador (P_1) por debajo del límite soportado por los diodos y las cargas de prueba. La resolución del ADC (Convertidor Analógico-Digital) del DAQ se elige en función de la relación mV por dB que presenten los diodos detectores utilizados, pero se recomienda un ADC de al menos una resolución de 11 bits. El equipo de cómputo que se requiere debe tener la capacidad de resolver ecuaciones cuadráticas y de graficar los tres círculos en el plano complejo Γ , por lo que incluso una tarjeta de desarrollo puede ser utilizada como PC.

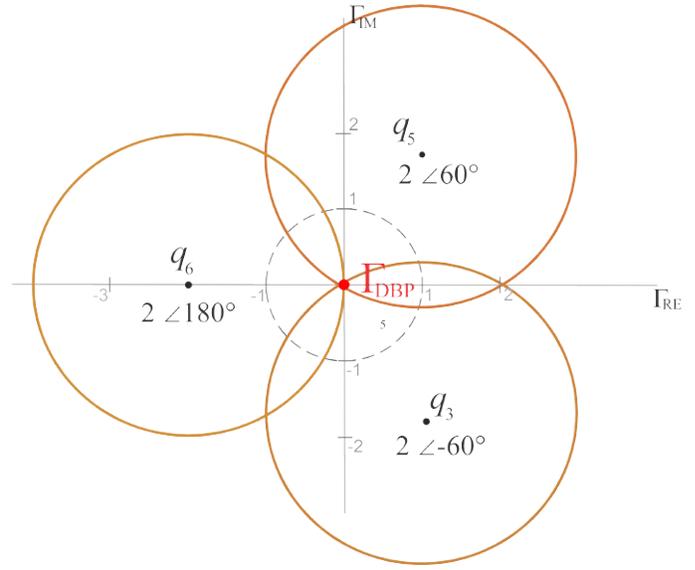


Fig. 6. Ubicación de los centros (puntos q) teóricos e ideales del circuito hexaportal propuesto, obtenidos mediante el análisis de puertos. Emulando la medición de una carga acoplada como DBP.

III. SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA ESTRUCTURA HEXAPORTAL

Para validar experimentalmente la distribución de potencias de la red hexaportal, es decir, sus parámetros S , se sintetizó un circuito de seis puertos en microcinta a una frecuencia de 2.4 GHz. Esto se hizo con los datos de las secciones de líneas de transmisión que componen el circuito y que se muestran en la Fig. 7. Se utilizó un sustrato Duroid 6006 con características según su fabricante de: $h=1.27\text{mm}$, $\varepsilon_r=6.15$, $\delta=0.0027$, $t=35\mu\text{m}$. La simulación de los parámetros S se realizó con el programa ADS (Advance Design System) que utiliza el método de momentos (MoM), con los parámetros siguientes: plan de frecuencia adaptativa 1.5-3.5 GHz, 50 puntos, 1cm de aire, plano de tierra infinito, conductor perfecto. La nomenclatura de los puertos utilizada para la simulación es la misma que se muestra en la Fig. 7. Los resultados de la simulación de los parámetros S del circuito diseñado en Duroid 6006, se presentan en la Fig. 8.

Posteriormente, se construyó físicamente el circuito para la medición de sus parámetros S con un analizador de redes vectorial (VNA) ANRITSU MS46122A, con una configuración de: frecuencia 1.8-3 GHz, 250 puntos y una calibración SOLT 50Ω . El resultado de la medición de los parámetros S del hexapuerto con el VNA se presenta en la Fig. 9.

La comparación entre los parámetros S simulados y medidos muestran un comportamiento similar y apegado a los valores teóricos, ver Tabla I. Sin embargo, aunque se pueden percibir algunas ligeras diferencias, éstas siempre se presentan en mayor o menor grado y se deben a las discrepancias entre las características teóricas y reales del sustrato. También se deben al ruido y modelo de las soldaduras y conectores que se agregan al circuito ya construido y que no forman parte de la simulación. Aún así, se observó una diferencia promedio de 0.125 dB entre los valores teóricos y simulados, y de 0.831

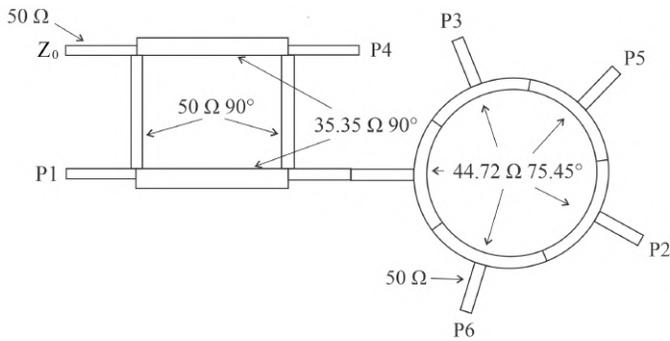


Fig. 7. Elementos de línea de transmisión que conforman la red hexaportal.

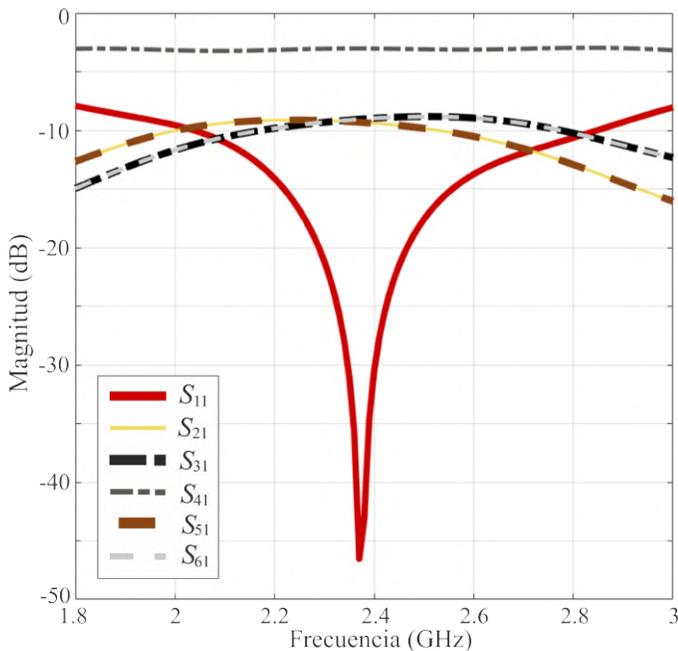


Fig. 8. Simulación de los parámetros S del circuito hexaportal en sustrato Duroid 6006 a 2.4 GHz.

dB entre los valores teóricos y medidos (S_{21} - S_{61}). Con base en nuestras pruebas, una diferencia promedio menor a de 1 dB entre los valores teóricos y medidos de los parámetros (S_{21} - S_{61}) se considera un buen resultado y esa diferencia aún pueden ser compensada en la etapa de calibración [25]. Por su parte, se observa un nivel de acoplamiento en el parámetro S_{11} , muy por debajo de los -10 dB, lo cual se considera un buen acoplamiento. A su vez, el parámetro S_{41} que sirve para obtener la señal P_4 que se usa como referencia para normalizar las potencias medidas en los otros puertos, tiende a un valor constante. Mientras que a la frecuencia central, los parámetros S_{21} , S_{31} , S_{51} y S_{61} correspondientes a los puertos de los diodos detectores restantes y del puerto del DBP (P_2) presentan valores con magnitudes similares entre sí, como lo describen las variables y los centros q del circuito. La comparación de la simulación y medición de estos parámetros a las frecuencias de estudio se muestran en la Fig. 10.

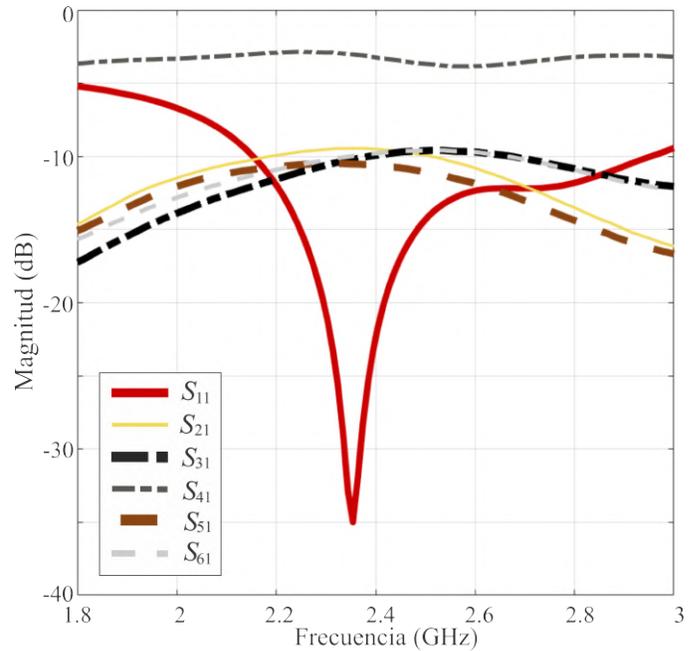


Fig. 9. Medición de los parámetros S del circuito hexaportal construido en Duroid 6006 a 2.4 GHz, medidos con un VNA Anritsu M246122A.

TABLA I
PARÁMETROS S DEL CIRCUITO HEXAPORTAL

Símbolo	Valor teórico	Simulación	Medición
f_c	2.4 GHz	2.37 GHz	2.354 GHz
S_{11}	< -10	-46.538 dB	-35.023 dB
S_{21}	-9.03 dB	-9.309 dB	-9.464 dB
S_{31}	-9.03 dB	-9.056 dB	-10.218 dB
S_{41}	-3.01 dB	-3.029 dB	-3.006 dB
S_{51}	-9.03 dB	-9.309 dB	-10.531 dB
S_{61}	-9.03 dB	-9.056 dB	-9.968 dB
S_{71}	< -10	-35.90 dB	-21.070 dB
B_w	.	800 MHz	798 MHz
% B_w	.	33.33 %	33.89 %

IV. ANÁLISIS DEL DISEÑO PROPUESTO Y SU DESEMPEÑO

Para poner a prueba la eficiencia del diseño, además de la red hexaportal construida en un material certificado y del cual sus especificaciones son proporcionadas por el fabricante, se construyó un circuito hexaportal adicional en un material genérico, el FR-4, con las características: $h=1.4\text{mm}$, $\epsilon_r=4.5$, $\delta=0.0019$ y $t=35\mu\text{m}$. Esto se hizo con la finalidad de evaluar el desempeño del diseño analizado en este artículo en distintas situaciones, como lo es un material certificado y otro genérico (dos calidades diferentes). Ambos circuitos se muestran en la Fig. 11. De igual manera que con el primer circuito, se midieron con el VNA los parámetros S del nuevo circuito sintetizado en FR4 con el VNA y los resultados obtenidos se muestran en el gráfico de la Fig. 12.

Los resultados obtenidos de esta comparativa muestran la versatilidad del diseño, puesto que con ambos materiales se obtuvieron valores muy cercanos a los valores teóricos, incluso con las diferencias que pudieran existir entre las características reales y teóricas del FR4, ver Tabla II y Fig. 13. La diferencia

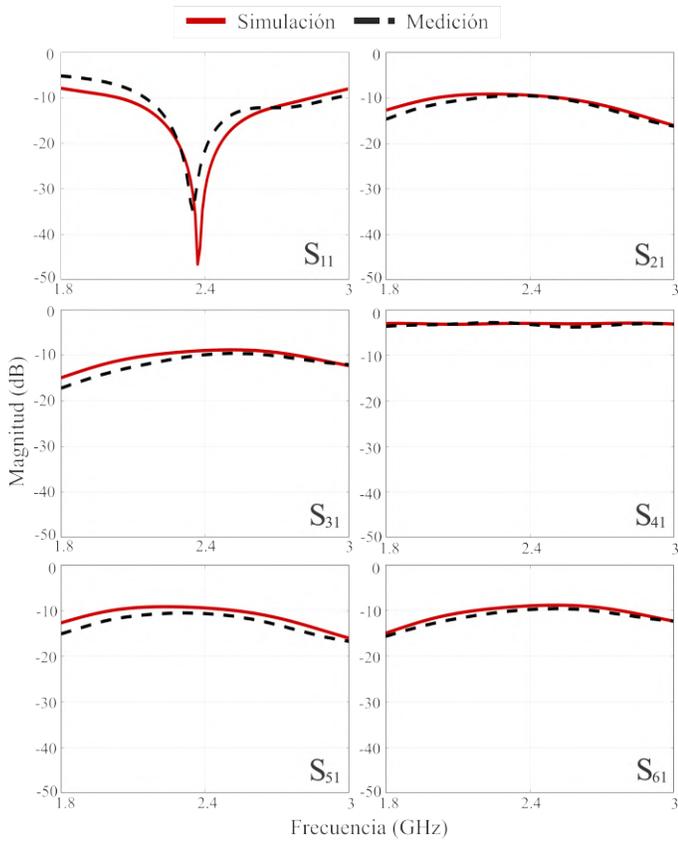


Fig. 10. Comparación entre los parámetros S simulados y medidos del circuito hexaportal en sustrato Duroid 6006 a 2.4 GHz.

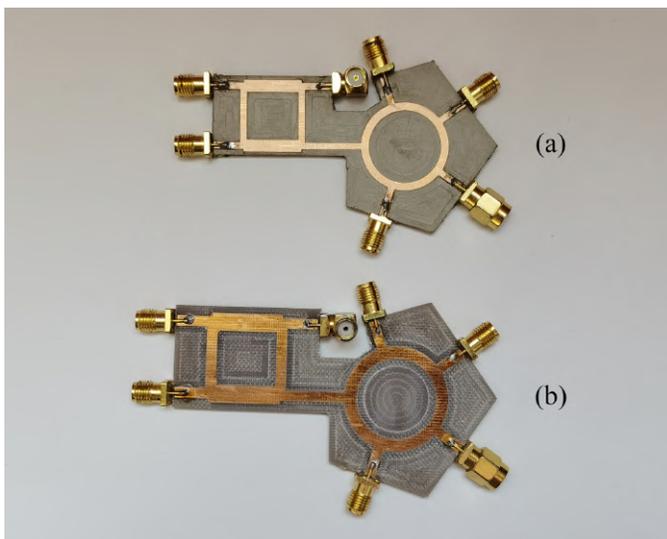


Fig. 11. Prototipo del circuito hexaportal construido en dos diferentes sustratos. Circuito en Duroid 6006 (a) y en FR4 (b).

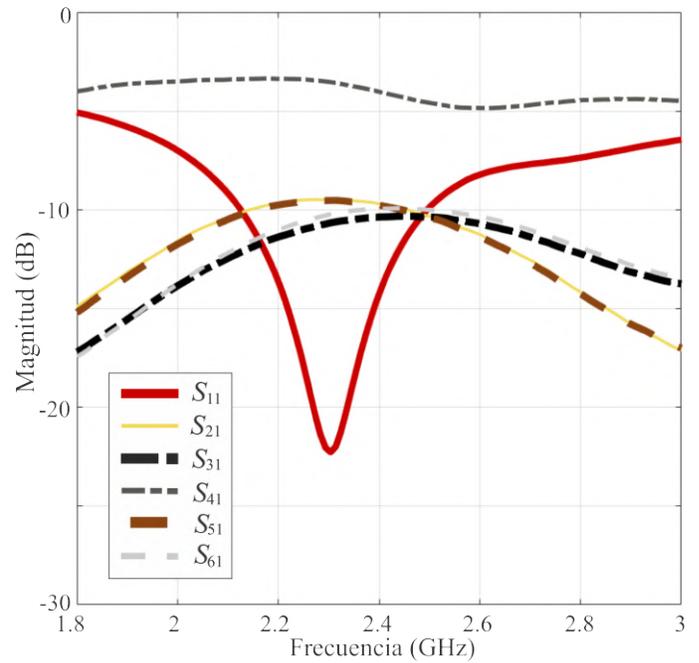


Fig. 12. Parámetros S del circuito hexaportal a 2.4 GHz construido en sustrato FR4, medidos con un VNA.

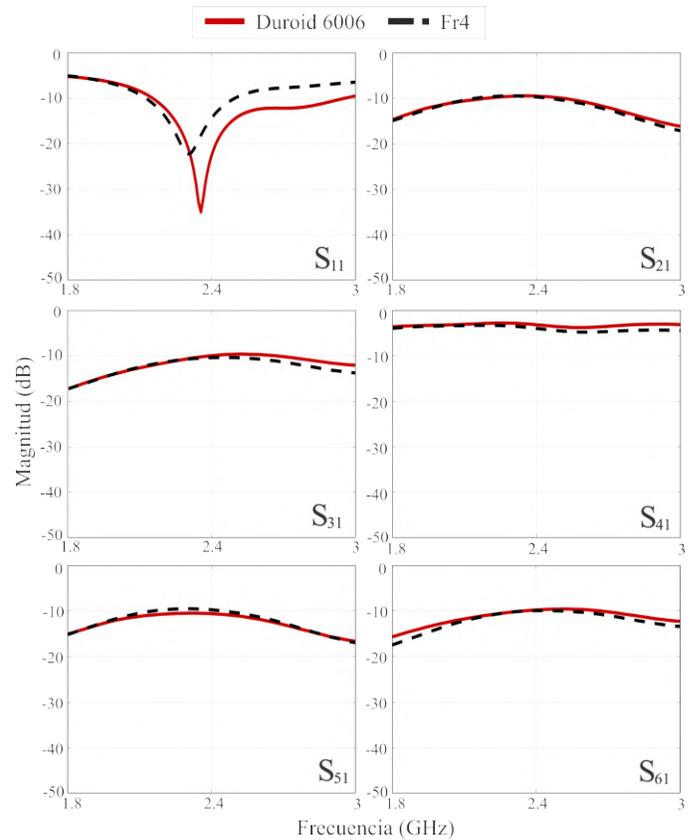


Fig. 13. Comparación de los parámetros S medidos con un VNA a 2.4 GHz del circuito hexaportal, pero construido en diferentes sustratos, Duroid 6006 y FR4.

TABLA II
PARÁMETROS S DEL CIRCUITO HEXAPORTAL CONSTRUIDO
EN DUROID 6006 Y EN FR4

Símbolo	Valor teórico	Duroid 6006	FR4
f_c	2.4 GHz	2.354 GHz	2.331 GHz
S_{11}	< -10	-35.023 dB	-21.40 dB
S_{21}	-9.03 dB	-9.464 dB	-9.13 dB
S_{31}	-9.03 dB	-10.218 dB	-9.96 dB
S_{41}	-3.01 dB	-3.006 dB	-3.71 dB
S_{51}	-9.03 dB	-10.531 dB	-8.96 dB
S_{61}	-9.03 dB	-9.968 dB	-9.75 dB
B_w	.	798 MHz	650 MHz
% B_w	.	33.89%	27.08%
Error promedio	.	0.69 dB	0.50 dB
% B_w	.	0.56 dB	0.93 dB %

entre un circuito hexaportal implementado en un material certificado contra uno no certificado es irrelevante siempre y cuando se presenten valores cercanos a los valores teóricos. Como se puede apreciar, ambos circuitos mostraron un ligero corrimiento en frecuencia con respecto a la frecuencia central de diseño. Sin embargo, este tipo de fenómenos se pueden corregir con técnicas de optimización durante la etapa de simulación. En caso de presentarse algunas discrepancias ligeras entre los valores teóricos y medidos, es posible reducirlos durante el proceso de calibración [26].

Algunos diseños interesantes del circuito de seis puertos se han propuesto. Por ejemplo, una versión modificada de [16] fue propuesta en [19], en donde se utilizaron cuatro acopladores de guía de onda coplanares. En [20], para conseguir un ancho de banda amplio (1.75-3.25 GHz), se implementó un circuito hexaportal de dos caras en microcinta con un arreglo de matrices Butler 4x4. En [17], se propuso una solución a la alta incertidumbre en los circuitos de ancho de banda amplio (2.5-3.5 GHz), mejorando la precisión de la medición al emplear una distribución ideal en los puntos q del circuito, el diseño resultante es conformado por tres acopladores híbridos de 90°, dos divisores de potencia de dos vías y dos resistores dentro del circuito en microcinta de dos caras. Algunas otras propuestas han resuelto uno de los grandes retos de la técnica, tales como la necesidad del acoplamiento de los diodos detectores [21]. No obstante, hay que tener en cuenta que en este tipo de circuitos se emplea una distribución distinta de centros q , utilizando cuatro en lugar de tres y el circuito resultante está conformado por dos divisores de potencia de dos vías, dos desfasadores y dos acopladores híbridos de 90°.

Al hablar de circuitos de seis puertos para reflectometría, no hay que olvidar que el principal objetivo del diseño del circuito es brindar una medición óptima del Γ_{DBP} , lo cual se logra en gran medida siguiendo el criterio de Engen [16]. Por lo tanto, se considera que un diseño con una distribución equidistante en sus puntos q es óptimo. El circuito hexaportal propuesto en este artículo, es una gran alternativa para el diseño del circuito hexaportal para reflectometría. Este circuito se puede implementar en una estructura de solo dos acopladores direccionales, en un circuito de microcinta de una sola cara sin elementos adicionales dentro de la estructura y con el sustento teórico

para su diseño. Además, presenta una distribución equidistante en sus puntos q , lo que permite reducir la incertidumbre en la medición del Γ_{DBP} . Incluso, puede trasladarse en frecuencia, siempre y cuando las características del sustrato lo permitan. Este diseño también puede reducir el costo de fabricación, no solo por usar menos componentes, sino también porque reduce la complejidad del equipo utilizado para su fabricación. Además, su versatilidad ha demostrado ser eficiente incluso en sustratos económicos como el FR4. Aunque hay características por mejorar como el ancho de banda, sigue siendo una gran alternativa debido a sus ventajas mencionadas anteriormente, tanto para su uso en un reflectómetro como equipo de medición como para la aplicaciones de la técnica en otras áreas de interés.

V. CONCLUSIONES

En este artículo, se demostró teórica y experimentalmente como el diseño propuesto de un circuito hexaportal es eficiente para reflectometría, esto, con un diseño sencillo y conformado únicamente con dos acopladores direccionales en microcinta.

Los puntos q del circuito de seis puertos se validaron teóricamente a partir de un análisis de puertos, en donde se demostró que al utilizar un acoplador híbrido de 90° como divisor de dos vías en este tipo de configuración, se sigue manteniendo una distribución equidistante en los puntos q . También, se sintetizaron las dimensiones del circuito en sustrato Duroid 6006 y se realizó la simulación de los parámetros S , posteriormente se construyó el circuito y se midieron los parámetros S con un VNA. Observando un comportamiento similar y de gran semejanza entre los valores teóricos, simulados y medidos. Además, se construyó un circuito adicional en un material genérico y no certificado, FR4. Al comparar los parámetros S de ambas estructuras de distintos materiales se demostró la versatilidad del diseño en distintas condiciones, puesto que ambos resultados presentaron valores semejantes.

Con base en los datos presentados, este diseño logra optimizar el proceso de la implementación del circuito hexaportal frente a otros diseños previamente propuestos, ya que, la etapa de diseño e implementación del circuito hexaportal suele ser una tarea complicada. Este diseño aún tiene características por mejorar como su ancho de banda, pero por sus ventajas naturales por su estructura es una gran opción para quien desee implementar un reflectómetro hexaportal. Ya sea para utilizar el reflectómetro como una alternativa al VNA comercial o para aprovechar alguna de sus aplicaciones en laboratorios de investigación.

REFERENCIAS

- [1] G. F. Engen, "The Six-Port Reflectometer: An Alternative Network Analyzer, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 25, no. 12, pp. 1075-1080, Dec. 1977.
- [2] C. A. Hoer, "A Network Analyzer Incorporating Two Six-Port Reflectometers, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 25, no. 12, pp. 1070-1074, Dec. 1977.
- [3] J. Martínez Moreno, A. S. Medina Vázquez, C. A. Bonilla Barragán, J. M. Villegas González and J. C. Aldaz Rosas, "Radio Frequency Energy Harvesting System Making Use of 180° Hybrid Couplers and Multiple Antennas to Improve the DC Output Voltage, in IEEE Latin America Transactions, vol. 18, no. 03, pp. 604-612, March 2020.

- [4] S. Linz, F. Lurz, R. Weigel and A. Koelpin, "Squircle-Based Calibration Algorithm for Six-Port Radar," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 10, pp. 4023-4030, Oct. 2019.
- [5] S. Linz, F. Lurz, R. Weigel and A. Koelpin, "Extended Ellipse-based Reconstruction Algorithm for Six-port Radar," 2019 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), Orlando, FL, USA, 2019, pp. 1-3.
- [6] F. M. Ghannouchi and R. G. Bosisio, "Measurement of microwave permittivity using a six-port reflectometer with an open-ended coaxial line," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 38, no. 2, pp. 505-508, April 1989.
- [7] S. Somwong, P. Wounchoum, M. Chongcheawchamnan, "Contamination detection in fresh natural rubber latex by a dry rubber content measurement system using microwave reflectometer," *Biosystems Engineering*, 2017, vol. 164, pp. 181-188.
- [8] P. Feng and S. Yan, "Design of Frequency Compensated Six-Port Junction and its Application in Microfluidic Sensing," 2021 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Nanjing, China, 2021, pp. 1-3.
- [9] S. Julrat and S. Trabelsi, "Portable Six-Port Reflectometer for Determining Moisture Content of Biomass Material," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 15, pp. 4814-4819, 1 Aug. 1, 2017.
- [10] K. Staszek, I. Piekarcz, J. Sorocki, S. Koryciak, K. Wincza and S. Gruszczynski, "Low-Cost Microwave Vector System for Liquid Properties Monitoring," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 2, pp. 1665-1674, Feb. 2018.
- [11] M. Hofmann, G. Fischer, R. Weigel and D. Kissinger, "Microwave-Based Noninvasive Concentration Measurements for Biomedical Applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 61, no. 5, pp. 2195-2204, May 2013.
- [12] G. Vinci et al., "Six-Port Radar Sensor for Remote Respiration Rate and Heartbeat Vital-Sign Monitoring," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 61, no. 5, pp. 2093-2100, May 2013.
- [13] S. Julrat and S. Trabelsi, "Portable Six-Port Reflectometer for Determining Moisture Content of Biomass Material," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 15, pp. 4814-4819, 1 Aug. 1, 2017.
- [14] H. Arab, L. Chioukh, M. Dashti Ardakani, S. Dufour and S. O. Tatu, "Early-Stage Detection of Melanoma Skin Cancer Using Contactless Millimeter-Wave Sensors," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 13, pp. 7310-7317, 1 July 1, 2020.
- [15] Kamil Staszek, "Investigation on Optimum Parameters of Six-Port Reflectometers," *International Journal of Information and Electronics Engineering* vol. 9, no. 1, pp. 30-33, 2019.
- [16] G. F. Engen, "An Improved Circuit for Implementing the Six-Port Technique of Microwave Measurements," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 25, no. 12, pp. 1080-1083, Dec. 1977.
- [17] K. Staszek, S. Gruszczynski and K. Wincza, "Six-Port Reflectometer Providing Enhanced Power Distribution," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 64, no. 3, pp. 939-951, March 2016.
- [18] K. Staszek, S. Gruszczynski and K. Wincza, "Theoretical Limits and Accuracy Improvement of Reflection-Coefficient Measurements in Six-Port Reflectometers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 61, no. 8, pp. 2966-2974, Aug. 2013.
- [19] J. J. Yao and S. P. Yeo, "Six-Port Reflectometer Based on Modified Hybrid Couplers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 56, no. 2, pp. 493-498, Feb. 2008.
- [20] A. Hassan, O. Abbas, "Design of a wide band six port reflectometer using broadside coupled lines," *Microwave and optical technology letters*, 2018, vol. 60, Issue 9, pp. 2101-2103.
- [21] K. Staszek, "Balanced six-port reflectometer with nonmatched power detectors," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 69, no. 11, pp. 4869-4878, Nov. 2021.
- [22] G. P. Riblet and E. R. B. Hansson, "The Use of a Matched Symmetrical Five-Port Junction to Make Six-Port Measurements," 1981 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1981.
- [23] A. D. Jimenez, "Lumped- and distributed-element equivalent circuits for some symmetrical multiport signal-separation structures," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 45, no. 9, pp. 1537-1544, Sept. 1997.
- [24] R. Sinha, "Design of Multi-Port With Desired Reference Impedances Using Y-Matrix and Matching Networks," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 68, no. 5, pp. 2096-2106, May 2021.
- [25] K. Staszek, S. Gruszczynski and K. Wincza, "Measurement Accuracy Enhancement in Six-Port Reflectometers," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 25, no. 8, pp. 553-555, Aug. 2015.
- [26] K. Staszek, "Six-Port Calibration Utilizing Matched Load and Unknown Calibration Loads," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 10, pp. 4617-4626, Oct. 2018.



Gerardo Hernández Communications and electronic engineer, in 2019 received his M. Sc. degree of Electronic and Computer Engineering by Universidad de Guadalajara, in electronic design. Currently getting his PhD in Electronic Engineering in the Electrical Engineering Department of Universidad de Guadalajara. His topics of interest are design and PCB circuit printing, antenna design and microstrip circuits, signal and high frequency analysis, as well as optoelectronics and semiconductor physics.



Felipe Uribe (Senior Member, IEEE) received the M.Sc. degrees in electrical engineering from the University of Guadalajara, Guadalajara, México, in 1998 and the Ph.D. degree in electrical engineering from the Center for Research and Advanced Studies, Guadalajara, México, in 2002. From 2003 to 2006, he was a Full Professor with the Electrical Graduate Program, Autonomous University of Nuevo Leon, San Nicolás de los Garza, Mexico. In May 2006, he joined the Electrical Engineering Graduate Program, University of Guadalajara, where he is currently a full-time Researcher. His primary interests include the signal and image processing techniques for harmonic and transient analysis of smart grids.



Carlos Alberto Bonilla Barragán was born in Guadalajara, Jalisco, México, on September 5th, 1965. He received the B.Sc. degree in electronic and communications engineering and the MSc degree in Electronic Engineering with specialization in high frequencies from the Universidad de Guadalajara, Jalisco, México, in 1992 and 2005 respectively. In 2013 he obtains his PhD in Sciences with the specialty of Electrical Engineering in High frequencies, degree obtained in the Universidad Autónoma de Baja California (UABC) in Mexicali. From 1994 is working as a teacher in the Universidad de Guadalajara. His areas of interest are the Design of Microwave Circuits and Antennas, Six-port reflectometers, and RF Harvesting circuits.