

Planteamiento del Modelo Matemático de una Técnica de Calibración para un Analizador de Redes Hexaportal

C. A. Bonilla Barragán,^a A. G. Andrade Reatiga,^b A. Dueñas Jiménez^a

^a Universidad de Guadalajara
 Av. Revolución 1500, Col. Universitaria, 44840, Jalisco, México.
 cbonilla_esc@yahoo.com.mx

^b Universidad Autónoma de Baja California
 Blvd. Benito Juárez, S/N, Unidad Universitaria, 21280, Baja California, México.

RESUMEN

En este artículo se plantea el modelo matemático para una técnica de calibración para analizadores de redes hexaportales, constituidos por analizadores de reflexión calibrados independientemente. La hipótesis es que ambas, la precisión (repetibilidad) y la exactitud serán mejoradas y que aún cuando el número de estándares necesarios para su calibración se incrementa la técnica es aún computacionalmente eficiente.

1. INTRODUCCIÓN

En 1977 se formaliza y consolida el concepto de reflectometría hexaportal luego de que se publicaron los trabajos fundamentales de Engen [1] y Hoer [2] en los que se definieron los criterios de diseño para reflectómetros y analizadores de redes. En los años que siguieron, ambos autores presentaron varias técnicas nuevas de calibración para estos instrumentos. Una de estas técnicas conocida como *thru-reflect-line* (TRL por sus siglas en inglés) [3] es actualmente la técnica más usada para calibrar analizadores de redes comerciales. Aunque esta técnica es propia o innata a los analizadores de redes hexaportales, no necesariamente es la más adecuada para estos instrumentos, ya que un analizador de redes hexaportal está conformado por la conexión de dos reflectómetros hexaportales que tienen características propias e independientes dadas por cada uno de los elementos que los constituyen, esto es, los sensores de potencia, las estructuras separadoras de señal, etc. Con esta perspectiva, en este trabajo se propone el modelo matemático para una nueva técnica de calibración que toma en cuenta las características individuales de cada elemento a partir de una calibración independiente de cada reflectómetro [4] para luego conjuntarlas en una calibración única del analizador de redes como un todo.

2. TEORÍA DE LA REFLECTOMETRÍA Y TRANSFEROMETRÍA CON HEXAPUERTOS

La Fig.1 muestra dos hexapuertos lineales arbitrarios (α y β) con un generador que alimenta a ambos a través de un divisor de potencia, ocho

detectores de potencia y un dispositivo bajo prueba (DBP) conectados a sus puertos.

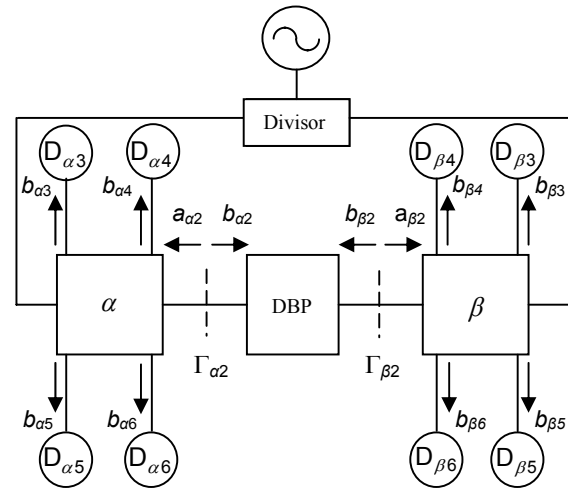


Fig. 1. Analizador de Redes Hexaportal.

Las ondas incidente y reflejada en cada puerto del hexapuerto α , designadas por $a_{\alpha i}$ y $b_{\alpha i}$ ($i = 1, \dots, 6$), respectivamente, se relacionan por:

$$\mathbf{b}_\alpha = \mathbf{S}_\alpha \mathbf{a}_\alpha, \tag{1a}$$

$$\mathbf{b}_\alpha = \begin{bmatrix} b_{\alpha 1} \\ b_{\alpha 2} \\ b_{\alpha 3} \\ b_{\alpha 4} \\ b_{\alpha 5} \\ b_{\alpha 6} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{a}_\alpha = \begin{bmatrix} a_{\alpha 1} \\ a_{\alpha 2} \\ a_{\alpha 3} \\ a_{\alpha 4} \\ a_{\alpha 5} \\ a_{\alpha 6} \end{bmatrix}, \tag{1b}$$

y S_α es la matriz de dispersión 6×6 del hexapuerto α .

Designando al coeficiente de reflexión en los detectores $D_{\alpha j}$ por $\Gamma_{\alpha j}$, se tiene que

$$\Gamma_{\alpha j} = \frac{a_{\alpha j}}{b_{\alpha j}}, \quad (2)$$

y sustituyendo la Ec. (2) en la Ec. (1.a), resulta que:

$$b_{\alpha i} = S_{\alpha i1} a_{\alpha 1} + S_{\alpha i2} a_{\alpha 2} + \sum_{j=3}^6 S_{\alpha ij} \Gamma_{\alpha j} b_{\alpha j}; \quad (3)$$

para $i = 1$ y 2 ,

y,

$$0 = S_{\alpha i1} a_{\alpha 1} + S_{\alpha i2} a_{\alpha 2} + \sum_{\substack{j=3 \\ i \neq j}}^6 S_{\alpha ij} \Gamma_{\alpha j} b_{\alpha j} + (S_{\alpha ii} \Gamma_{\alpha i} - 1) b_{\alpha i}; \quad (4)$$

para $i = 3, 4, 5$ y 6 ,

las cuales representan un sistema de 10 ecuaciones con 12 variables que puede ser resuelto para cualesquiera 10 variables en función de las dos restantes.

Las Ecs. (3) y (4) pueden ser expresadas en forma matricial de la siguiente manera:

$$\mathbf{b}'_\alpha = \mathbf{S}'_\alpha \mathbf{a}'_\alpha, \quad (5a)$$

$$\mathbf{b}'_\alpha = \begin{bmatrix} b_{\alpha 1} \\ b_{\alpha 2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{a}'_\alpha = \begin{bmatrix} a_{\alpha 1} \\ a_{\alpha 2} \\ b_{\alpha 3} \\ b_{\alpha 4} \\ b_{\alpha 5} \\ b_{\alpha 6} \end{bmatrix}, \quad (5b)$$

y \mathbf{S}'_α es la matriz de dispersión modificada dada por:

$$\mathbf{S}'_\alpha = \begin{bmatrix} S_{\alpha 11} & S_{\alpha 12} & S_{\alpha 13} \Gamma_3 \\ S_{\alpha 21} & S_{\alpha 22} & S_{\alpha 23} \Gamma_3 \\ S_{\alpha 31} & S_{\alpha 32} & S_{\alpha 33} \Gamma_3 - 1 \\ S_{\alpha 41} & S_{\alpha 42} & S_{\alpha 43} \Gamma_3 \\ S_{\alpha 51} & S_{\alpha 52} & S_{\alpha 53} \Gamma_3 \\ S_{\alpha 61} & S_{\alpha 62} & S_{\alpha 63} \Gamma_3 \\ S_{\alpha 14} \Gamma_4 & S_{\alpha 15} \Gamma_5 & S_{\alpha 16} \Gamma_6 \\ S_{\alpha 24} \Gamma_4 & S_{\alpha 25} \Gamma_5 & S_{\alpha 26} \Gamma_6 \\ S_{\alpha 34} \Gamma_4 & S_{\alpha 35} \Gamma_5 & S_{\alpha 36} \Gamma_6 \\ S_{\alpha 44} \Gamma_4 - 1 & S_{\alpha 45} \Gamma_5 & S_{\alpha 46} \Gamma_6 \\ S_{\alpha 54} \Gamma_4 & S_{\alpha 55} \Gamma_5 - 1 & S_{\alpha 56} \Gamma_6 \\ S_{\alpha 64} \Gamma_4 & S_{\alpha 65} \Gamma_5 & S_{\alpha 66} \Gamma_6 - 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Si las 10 ecuaciones son independientes, la matriz \mathbf{S}'_α es no singular (lo cual sucede en la práctica) y por tanto \mathbf{S}'_α puede ser invertida para dar:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{v}_\alpha &= (\mathbf{S}'_\alpha)^{-1}, \\ \mathbf{a}'_\alpha &= \mathbf{V}_\alpha \mathbf{b}'_\alpha. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Desarrollando la Ec. (7) se tiene que:

$$a_{\alpha i} = v_{\alpha i1} b_{\alpha 1} + v_{\alpha i2} b_{\alpha 2}; \quad \text{para } i = 1 \text{ y } 2, \quad (8)$$

$$b_{\alpha i} = v_{\alpha i1} b_{\alpha 1} + v_{\alpha i2} b_{\alpha 2}; \quad \text{para } i = 3, 4, 5 \text{ y } 6 \quad (9)$$

donde $v_{\alpha ij}$ ($j = 1$ y 2) son los elementos de la matriz \mathbf{V}_α .

De la Ec. (8), y para $i = 2$, dado que el DBP se encuentra conectado al puerto 2 del hexapuerto α de la Fig. 1, se tiene que:

$$\left. \begin{aligned} a_{\alpha 2} &= v_{\alpha 21} b_{\alpha 1} + v_{\alpha 22} b_{\alpha 2}, \\ b_{\alpha 1} &= \frac{a_{\alpha 2} - v_{\alpha 22} b_{\alpha 2}}{v_{\alpha 21}}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Sustituyendo $b_{\alpha 1}$ en la Ec. (9) resulta que:

$$b_{\alpha i} = I_{\alpha i} a_{\alpha 2} + J_{\alpha i} b_{\alpha 2}; \text{ para } i=3, 4, 5 \text{ y } 6, \quad (11a)$$

$$I_{\alpha i} = \frac{V_{\alpha i 1}}{V_{\alpha 2 1}}; \quad (11b)$$

$$J_{\alpha i} = V_{\alpha i 2} - \frac{V_{\alpha 2 2} V_{\alpha i 1}}{V_{\alpha 2 1}}; \text{ para } i = 3, 4, 5 \text{ y } 6. \quad (11c)$$

Así, utilizando la nomenclatura empleada por Engen [1], para el hexapuerto α se tiene que:

$$\begin{aligned} b_{\alpha 3} &= I_{\alpha 3} a_{\alpha 2} + J_{\alpha 3} b_{\alpha 2} \\ &= A_{\alpha} a_{\alpha 2} + B_{\alpha} b_{\alpha 2} = A_{\alpha} b_{\alpha 2} \left(\Gamma_{\alpha 2} + \frac{B_{\alpha}}{A_{\alpha}} \right), \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{\alpha 4} &= I_{\alpha 4} a_{\alpha 2} + J_{\alpha 4} b_{\alpha 2} \\ &= C_{\alpha} a_{\alpha 2} + D_{\alpha} b_{\alpha 2} = C_{\alpha} b_{\alpha 2} \left(\Gamma_{\alpha 2} + \frac{D_{\alpha}}{C_{\alpha}} \right), \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{\alpha 5} &= I_{\alpha 5} a_{\alpha 2} + J_{\alpha 5} b_{\alpha 2} \\ &= E_{\alpha} a_{\alpha 2} + F_{\alpha} b_{\alpha 2} = E_{\alpha} b_{\alpha 2} \left(\Gamma_{\alpha 2} + \frac{F_{\alpha}}{E_{\alpha}} \right), \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{\alpha 6} &= I_{\alpha 6} a_{\alpha 2} + J_{\alpha 6} b_{\alpha 2} \\ &= G_{\alpha} a_{\alpha 2} + H_{\alpha} b_{\alpha 2} = G_{\alpha} b_{\alpha 2} \left(\Gamma_{\alpha 2} + \frac{H_{\alpha}}{G_{\alpha}} \right), \quad (15) \end{aligned}$$

$$\text{con } \Gamma_{\alpha 2} = \frac{a_{\alpha 2}}{b_{\alpha 2}}, \frac{B_{\alpha}}{A_{\alpha}} = -q_{\alpha 3}, \frac{F_{\alpha}}{E_{\alpha}} = -q_{\alpha 5} \text{ y } \frac{H_{\alpha}}{G_{\alpha}} = -q_{\alpha 6}.$$

De igual manera, para el hexapuerto β , se tiene:

$$\begin{aligned} b_{\beta 3} &= I_{\beta 3} a_{\beta 2} + J_{\beta 3} b_{\beta 2} \\ &= A_{\beta} a_{\beta 2} + B_{\beta} b_{\beta 2} = A_{\beta} b_{\beta 2} \left(\Gamma_{\beta 2} + \frac{B_{\beta}}{A_{\beta}} \right), \quad (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{\beta 4} &= I_{\beta 4} a_{\beta 2} + J_{\beta 4} b_{\beta 2} \\ &= C_{\beta} a_{\beta 2} + D_{\beta} b_{\beta 2} = C_{\beta} b_{\beta 2} \left(\Gamma_{\beta 2} + \frac{D_{\beta}}{C_{\beta}} \right), \quad (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{\beta 5} &= I_{\beta 5} a_{\beta 2} + J_{\beta 5} b_{\beta 2} \\ &= E_{\beta} a_{\beta 2} + F_{\beta} b_{\beta 2} = E_{\beta} b_{\beta 2} \left(\Gamma_{\beta 2} + \frac{F_{\beta}}{E_{\beta}} \right), \quad (18) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{\beta 6} &= I_{\beta 6} a_{\beta 2} + J_{\beta 6} b_{\beta 2} \\ &= G_{\beta} a_{\beta 2} + H_{\beta} b_{\beta 2} = G_{\beta} b_{\beta 2} \left(\Gamma_{\beta 2} + \frac{H_{\beta}}{G_{\beta}} \right), \quad (19) \end{aligned}$$

$$\text{con } \Gamma_{\beta 2} = \frac{a_{\beta 2}}{b_{\beta 2}}, \frac{B_{\beta}}{A_{\beta}} = -q_{\beta 3}, \frac{F_{\beta}}{E_{\beta}} = -q_{\beta 5} \text{ y } \frac{H_{\beta}}{G_{\beta}} = -q_{\beta 6}.$$

Ahora bien, los coeficientes de reflexión $\Gamma_{\alpha 2}$ y $\Gamma_{\beta 2}$ se pueden expresar en función de los parámetros de dispersión del DBP de la siguiente manera:

$$\Gamma_{\alpha 2} = \frac{a_{\alpha 2}}{b_{\alpha 2}} = S_{11} + S_{12} \frac{b_{\beta 2}}{b_{\alpha 2}}, \quad (20 a)$$

$$\Gamma_{\beta 2} = \frac{a_{\beta 2}}{b_{\beta 2}} = S_{22} + S_{21} \frac{b_{\alpha 2}}{b_{\beta 2}}, \quad (20 b)$$

donde:

$$S_{11} = \left. \frac{a_{\alpha 2}}{b_{\alpha 2}} \right|_{b_{\beta 2}=0}, \quad (21a)$$

$$S_{12} = \left. \frac{a_{\alpha 2}}{b_{\beta 2}} \right|_{b_{\alpha 2}=0}, \quad (21b)$$

$$S_{21} = \left. \frac{a_{\beta 2}}{b_{\alpha 2}} \right|_{b_{\beta 2}=0}, \quad (21c)$$

$$S_{22} = \left. \frac{a_{\beta 2}}{b_{\beta 2}} \right|_{b_{\alpha 2}=0}, \quad (21 d)$$

como se puede observar de la Fig. 1.

Por otro lado, generalizando de los conjuntos de las Ecs. (12)-(15) y Ecs. (16)-(19) para $k = 3, 4, 5$ y 6 se tiene que:

$$b_{\alpha k} = I_{\alpha k} b_{\alpha 2} \left(\Gamma_{\alpha 2} + \frac{J_{\alpha k}}{I_{\alpha k}} \right), \quad (22a)$$

$$b_{\beta k} = I_{\beta k} b_{\beta 2} \left(\Gamma_{\beta 2} + \frac{J_{\beta k}}{I_{\beta k}} \right), \quad (22b)$$

de donde, al sustituir la Ec. (20) resulta que:

$$\begin{aligned} b_{\alpha k} &= (I_{\alpha k} \Gamma_{\alpha 2} + J_{\alpha k}) b_{\alpha 2} \\ &= (I_{\alpha k} S_{11} + J_{\alpha k}) b_{\alpha 2} + I_{\alpha k} S_{12} b_{\beta 2} \end{aligned} \quad (23a)$$

y

$$\begin{aligned} b_{\beta k} &= (I_{\beta k} \Gamma_{\beta 2} + J_{\beta k}) b_{\beta 2} \\ &= (I_{\beta k} S_{22} + J_{\beta k}) b_{\beta 2} + I_{\beta k} S_{21} b_{\alpha 2}. \end{aligned} \quad (23b)$$

Luego, de las Ecs. (22a) y (22b), las señales incidentes en el DBP $b_{\alpha 2}$ y $b_{\beta 2}$ se pueden expresar como:

$$b_{\alpha 2} = \frac{b_{\alpha k}}{I_{\alpha k} \Gamma_{\alpha 2} + J_{\alpha k}} \quad (24a)$$

y

$$b_{\beta 2} = \frac{b_{\beta k}}{I_{\beta k} \Gamma_{\beta 2} + J_{\beta k}}. \quad (24b)$$

Cada una de las Ecs. (24) por separado representa cuatro ecuaciones ($k = 3, 4, 5$ y 6) que se combinan para generar doce nuevas ecuaciones, seis para $\Gamma_{\alpha 2}$ y seis para $\Gamma_{\beta 2}$ que se expresan en términos del índice k y de un nuevo índice m generado por las combinaciones. La forma generalizada de los dos conjuntos de seis ecuaciones está dada por:

$$\Gamma_{\alpha 2} = \frac{J_{\alpha k} b_{\alpha m} - J_{\alpha m} b_{\alpha k}}{I_{\alpha m} b_{\alpha k} - I_{\alpha k} b_{\alpha m}} \quad (25a)$$

y

$$\Gamma_{\beta 2} = \frac{J_{\beta k} b_{\beta m} - J_{\beta m} b_{\beta k}}{I_{\beta m} b_{\beta k} - I_{\beta k} b_{\beta m}}, \quad (25b)$$

para las combinaciones:

$$\begin{aligned} k = 3 \text{ y } m = 4, \quad k = 3 \text{ y } m = 5, \quad k = 3 \text{ y } m = 6, \\ k = 4 \text{ y } m = 5, \quad k = 4 \text{ y } m = 6, \quad k = 5 \text{ y } m = 6. \end{aligned}$$

Ahora, de la segunda igualdad en las Ecs. (23a) y (23b), se explicitan nuevamente $b_{\alpha 2}$ y $b_{\beta 2}$ para dar:

$$b_{\alpha 2} = \frac{b_{\alpha k} - (I_{\alpha k} S_{12}) b_{\beta 2}}{(I_{\alpha k} S_{11} + J_{\alpha k})}, \quad (26a)$$

$$b_{\beta 2} = \frac{b_{\alpha k} - (I_{\alpha k} S_{11} + J_{\alpha k}) b_{\alpha 2}}{(I_{\alpha k} S_{12})}, \quad (26b)$$

$$b_{\alpha 2} = \frac{b_{\beta k} - (I_{\beta k} S_{22} + J_{\beta k}) b_{\beta 2}}{(I_{\beta k} S_{21})}, \quad (26c)$$

$$b_{\beta 2} = \frac{b_{\beta k} - (I_{\beta k} S_{21}) b_{\alpha 2}}{(I_{\beta k} S_{22} + J_{\beta k})} \quad (26d)$$

y de la igualación de las Ec. (26a) con la Ec. (26c) y de la Ec. (26b) con la Ec. (26d) se tiene que:

$$b_{\alpha 2} = \frac{(I_{\beta k} S_{22} + J_{\beta k}) b_{\alpha k} - (I_{\alpha k} S_{12}) b_{\beta k}}{(I_{\alpha k} I_{\beta k} \Delta + I_{\alpha k} J_{\beta k} S_{11} + I_{\beta k} J_{\alpha k} S_{22} + J_{\alpha k} J_{\beta k})} \quad (27a)$$

y

$$b_{\beta 2} = \frac{(I_{\alpha k} S_{11} + J_{\alpha k}) b_{\beta k} - (I_{\beta k} S_{21}) b_{\alpha k}}{(I_{\alpha k} I_{\beta k} \Delta + I_{\alpha k} J_{\beta k} S_{11} + I_{\beta k} J_{\alpha k} S_{22} + J_{\alpha k} J_{\beta k})}, \quad (27b)$$

Para $k=2, 4, 5$ y 6 , y:

$$\Delta = S_{11} S_{22} - S_{12} S_{21}. \quad (28)$$

Dividiendo la Ec. (27a) entre la Ec. (27b) se obtienen:

$$\frac{b_{\beta 2}}{b_{\alpha 2}} = \frac{(I_{\alpha k} S_{11} + J_{\alpha k}) b_{\beta k} - (I_{\beta k} S_{21}) b_{\alpha k}}{(I_{\beta k} S_{22} + J_{\beta k}) b_{\alpha k} - (I_{\alpha k} S_{12}) b_{\beta k}} \quad (29a)$$

y

$$\frac{b_{\alpha 2}}{b_{\beta 2}} = \frac{(I_{\beta k} S_{22} + J_{\beta k}) b_{\alpha k} - (I_{\alpha k} S_{12}) b_{\beta k}}{(I_{\alpha k} S_{11} + J_{\alpha k}) b_{\beta k} - (I_{\beta k} S_{21}) b_{\alpha k}}, \quad (29b)$$

las cuales representan dos conjuntos de cuatro ecuaciones que al ser sustituidos en la Ec. (20) generan finalmente, dos nuevos conjuntos de cuatro ecuaciones en los que se encuentran de manera implícita los parámetros de dispersión, generando así un sistema de ocho ecuaciones con ocho incógnitas (las partes real e imaginaria de los cuatro parámetros S). Estos conjuntos están dados de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\Gamma_{\alpha 2} &= S_{11} + S_{12} \frac{b_{\beta 2}}{b_{\alpha 2}} \\ &= S_{11} + S_{12} \left(\frac{(I_{\alpha k} S_{11} + J_{\alpha k}) b_{\beta k} - (I_{\beta k} S_{21}) b_{\alpha k}}{(I_{\beta k} S_{22} + J_{\beta k}) b_{\alpha k} - (I_{\alpha k} S_{12}) b_{\beta k}} \right) \quad (30a)\end{aligned}$$

y

$$\begin{aligned}\Gamma_{\beta 2} &= S_{22} + S_{21} \frac{b_{\alpha 2}}{b_{\beta 2}} \\ &= S_{22} + S_{21} \left(\frac{(I_{\beta k} S_{22} + J_{\beta k}) b_{\alpha k} - (I_{\alpha k} S_{12}) b_{\beta k}}{(I_{\alpha k} S_{11} + J_{\alpha k}) b_{\beta k} - (I_{\beta k} S_{21}) b_{\alpha k}} \right) \quad (30b)\end{aligned}$$

para $k = 3, 4, 5$ y 6 .

3. EXPECTATIVAS DE LA PROPUESTA

De una inspección de las expresiones dadas al final de la sección anterior, se puede observar que la Ec. (29) representa un sistema determinado no explícito de ecuaciones no lineales en el que los parámetros de dispersión del DBP son variables que dependen de los coeficientes de reflexión $\Gamma_{\alpha 2}$ y $\Gamma_{\beta 2}$ medidos por los reflectómetros, de $A_{\alpha} - H_{\alpha}$ y $A_{\beta} - H_{\beta}$ que son constantes complejas intrínsecas a las estructuras separadoras de señal y de $b_{\alpha i}$ y $b_{\beta i}$ ($i = 3, 4, 5$ y 6) que están asociadas con las lecturas de potencia obtenidas por los sensores. Una vez explicitado, este sistema puede ser resuelto con algún método de solución de sistemas de ecuaciones no lineales como el de la secante.

Para obtener estos valores de medición y con el objeto de validar experimentalmente la teoría que aquí se presenta, se construirá un analizador de redes hexaportal para operar en las bandas R, S, H y C de 2 GHz a 8 GHz. Como se muestra en la Fig. 1, el analizador se integrará a partir de dos reflectómetros "gemelos" previamente calibrados

que operarán en el mismo ancho de banda [4]. Las estructuras separadoras de señal de los reflectómetros estarán compuestas por varios divisores de potencia y acopladores direccionales simples [5]. Los sensores de potencia serán diodos comerciales del tipo coaxial de Arseniuro de Galio (GaAs) que trabajan en un ancho de banda de 0,01 GHz a 33 GHz (Agilent 8474C). Los sensores de instrumentos comerciales de medición se calibran típicamente con referencia a un estándar de transferencia que puede ser secundario, por ejemplo, el estándar secundario de medición de potencia es una montura bolométrica cuya eficiencia efectiva es medida por un estándar primario, en este caso, un microcalorímetro [6]. Así, existen estándares primarios y secundarios de tal forma que no se puede hablar de un patrón único de referencia, sino de un procedimiento en el que se obtienen los valores de potencia como una cantidad derivada de mediciones de temperatura.

4. CONCLUSIONES

Debido a la posibilidad de que la solución del sistema de ecuaciones no converja fácilmente aún cuando éste esté determinado, es posible que sea necesario generar más ecuaciones con el uso de más estándares de calibración. Con esto se lograría un sistema sobredeterminado de ecuaciones y al mismo tiempo se evitarían posibles ambigüedades en la solución. Así, es aún prematuro adelantar alguna conclusión respecto a la concordancia que habrá entre los resultados analíticos y los experimentales pero ya se puede predecir que ambas, la precisión y la exactitud se encontrarán dentro del orden de magnitud que ofrece cada reflectómetro independiente y que además la técnica es numéricamente eficaz. Esto se puede verificar al revisar la Fig. 4 de [4] en la que se comparan mediciones a una línea de microcinta con vuelta en ángulo recto, realizadas con un analizador de redes vectorial calibrado con la técnica *short-open-load-thru* (SOLT por sus siglas en inglés), y con un reflectómetro hexaportal calibrado con la técnica ahí propuesta para un reflectómetro sólo.

REFERENCIAS

- [1] G. F. Engen, *The six-port reflectometer: An alternative network analyzer*, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-25, pp. 1075-1080, Dec. 1977.
- [2] C. A. Hoer, *A network analyzer incorporating two six-port reflectometer*, IEEE Trans. Microwave

- Theory Tech., vol. MTT-25, pp. 1070-1074, Dec. 1977
- [3] G. F. Engen and C.A. Hoer, *Thru-reflect-line: An improved technique for calibrating the dual six-port automatic network analyzer*, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-27, pp. 987-993, Dec. 1979
- [4] A. Dueñas Jiménez, C. A. Bonilla Barragán, *On the calibration of a microwave network six-port reflection analyzer*, IEEE Trans. Instrum., Meas., vol. IM-56, pp. 1763-1769. Oct. 2007.
- [5] S. H. Li and R. G. Bosisio, *Analysis and optimized circuit design of six-port reflectometers*, Acta Electron. Sinica, vol. 11, Mar. 1983.
- [6] T. P. Crowley and F. R. Clague, *A 2.4 mm coaxial power standard at NIST*, British Electromagnetic Conf., Nov. 2001.