

Determinación de la Z_0 de una línea de transmisión midiendo ROE

Parte II

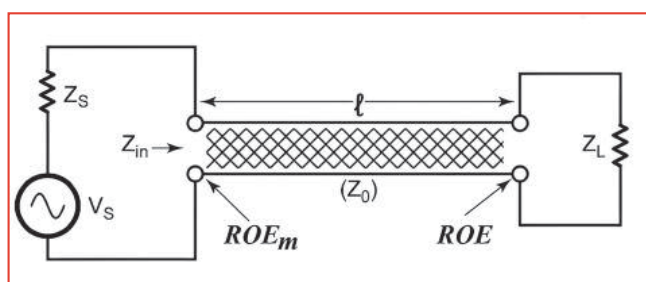
Por José Luis Giordano, CE4TW, y John Stanley, K4ERO.

Uno de los parámetros más importantes de las líneas de transmisión, es la impedancia característica Z_0 . Cuando se tiene una línea con Z_0 desconocida, hay diferentes opciones para medirla, pero no todas son asequibles o exactas. Sin embargo, los radioaficionados suelen tener medidores de ROE, externos o incluidos en el transmisor, con los que se puede determinar Z_0 . En un sistema de transmisión básico, formado por una fuente o transmisor con impedancia serie $Z_S = 50\Omega$, una línea de transmisión y la carga o antena, la expresión de la ROE involucra a Z_0 y a la impedancia Z_L de la carga (que en general suele tener reactancia). Para determinar Z_0 a partir de la medición de ROE, se puede utilizar el caso más simple, donde Z_L sea resistiva y entonces:[1]

$$ROE = \frac{Z_L}{Z_0} \quad (\text{si } Z_0 \leq Z_L) \quad ROE = \frac{Z_L}{Z_0}$$

$$ROE = \frac{Z_0}{Z_L} \quad (\text{si } Z_0 \geq Z_L) \quad ROE = \frac{Z_0}{Z_L}$$

Por lo tanto, usando una carga Z_L conocida, midiendo ROE se podría conocer Z_0 . Sin embargo, estas expresiones no se pueden usar directamente porque el instrumento generalmente está colocado entre la fuente y la línea, y entonces desde allí se ve la impedancia Z_{in} del "sistema de antena", que incluye línea y carga. En el caso en el que Z_{in} fuese resistiva, aplicando lo anterior, la ROE que se mide desde la entrada a la línea (que llamaremos " ROE_m "), será (Fig. 1)



$$ROE_m = \frac{Z_{in}}{Z_S} \quad ROE_m = \frac{Z_{in}}{Z_S} \quad (2a)$$

$$ROE_m = \frac{Z_S}{Z_{in}} \quad ROE_m = \frac{Z_S}{Z_{in}} \quad (2b)$$

Para que Z_{in} sea resistiva se puede usar la magia de las líneas de transmisión: Si las pérdidas son despreciables y si la longitud ℓ de la línea es igual a un cuarto de la longitud de onda de la señal, es decir

$$\ell = \frac{\lambda}{4} \quad (3)$$

la carga que verá el medidor de ROE será [2]

$$Z_{in} = \frac{Z_0^2}{Z_L} \quad (4)$$

que se conoce como "transformador de cuarto de onda". Entonces, como Z_0 no tiene reactancia, si usamos una Z_L resistiva, Z_{in} tampoco tendrá reactancia. Luego, reemplazando en la ec. (2) se tiene

$$ROE_m = \frac{Z_0^2}{Z_S Z_L} \quad (\text{si } Z_S \leq Z_{in}) \quad ROE_m$$

$$ROE_m = \frac{Z_S Z_L}{Z_0^2} \quad (\text{si } Z_S \geq Z_{in}) \quad ROE_m$$

Figura 1 — Esquema equivalente de un transmisor conectado a una antena a través de una línea de transmisión, donde se indican los diferentes valores de ROE que se explican en el texto.

Invirtiéndose estas expresiones para Z_0 y con $Z_S = 50 \Omega$, se obtienen los posibles valores superior e inferior de Z_0 : [3]

$$Z_0^+ = \sqrt{50 \Omega \times Z_L \times ROE_m} \quad (\text{si } 50 \Omega \leq Z_{in}) \quad (6a)$$

$$Z_0^- = \sqrt{\frac{50 \Omega \times Z_L}{ROE_m}} \quad (\text{si } 50 \Omega \geq Z_{in}) \quad (6b)$$

Para determinar cuál de los dos valores es Z_0 , se necesita más información sobre la línea. De todos modos, este método, realizado con la frecuencia fija, tiene la desventaja de requerir conocer el factor de velocidad de la línea para que su longitud realmente sea $\lambda/4$.

Desde el punto de vista experimental, es más práctico usar cualquier longitud y medir " ROE_m " mientras varía la frecuencia pasando por $\ell = \lambda/4$ o por un múltiplo impar. A continuación se muestra la simulación numérica de este experimento.

(a) Cuando el valor desconocido Z_0 está entre $Z_S (=50 \Omega)$ y Z_L , el mejor compromiso (desde el punto de vista de la adaptación de impedancia) es la media geométrica $\sqrt{Z_S Z_L}$. Por lo tanto, la " ROE_m " es menor cuando la frecuencia corresponde a $\ell = \lambda/4$, y entonces, el valor buscado de Z_0 se obtiene con el valor del mínimo de la curva de ROE. En la figura observamos que el mínimo es " ROE_m " = 1.13 (para 7.44 MHz). Usando las ecs. (6) obtenemos $Z_0^+ = 75.2 \Omega$ y $Z_0^- = 66.5 \Omega$. Entonces, la respuesta más probable es 75Ω , que es un valor típico de algunos coaxiales. Usando otras cargas con valores de Z_L diferentes, se verifica que se vuelve a repetir " 75Ω " y entonces, efectivamente el resultado es $Z_0 = 75 \Omega$.

(b) El otro caso posible ocurre cuando el valor Z_0 desconocido está fuera del intervalo (Z_S, Z_L). Entonces la media geométrica representa la peor adaptación y consecuentemente, el valor Z_0 se puede obtener del máximo en la curva. Para comprobar las ecs. (6) se realizó un experimento y la correspondiente simulación numérica (Fig. 3).

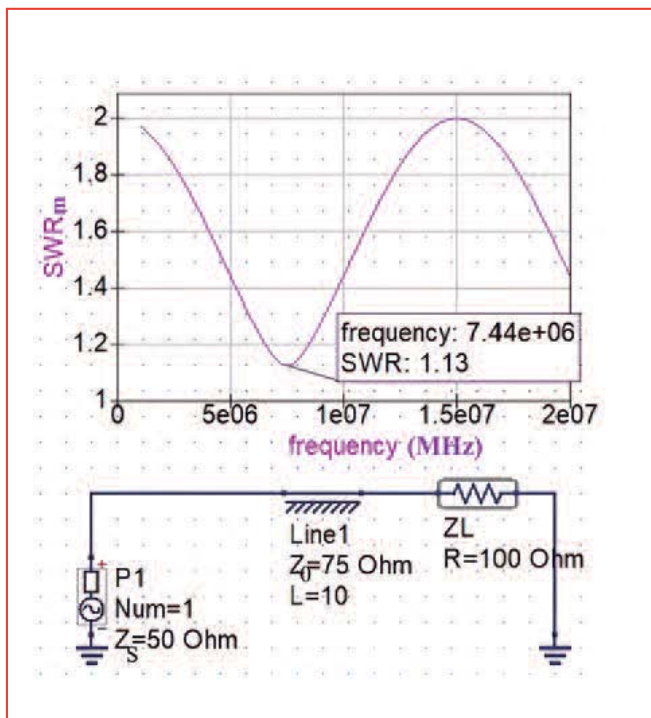


Figura 2 — Simulación numérica para una línea de 75Ω (ver texto).

En la Fig. 2 se ve el circuito del simulador y el resultado cuando $Z_0 = 75 \Omega$ o $Z_L = 100 \Omega$, usando un programa de distribución libre.[4] El resultado es la curva oscilatoria de " ROE_m " versus frecuencia donde para obtener Z_0 se tiene uno de dos casos posibles.

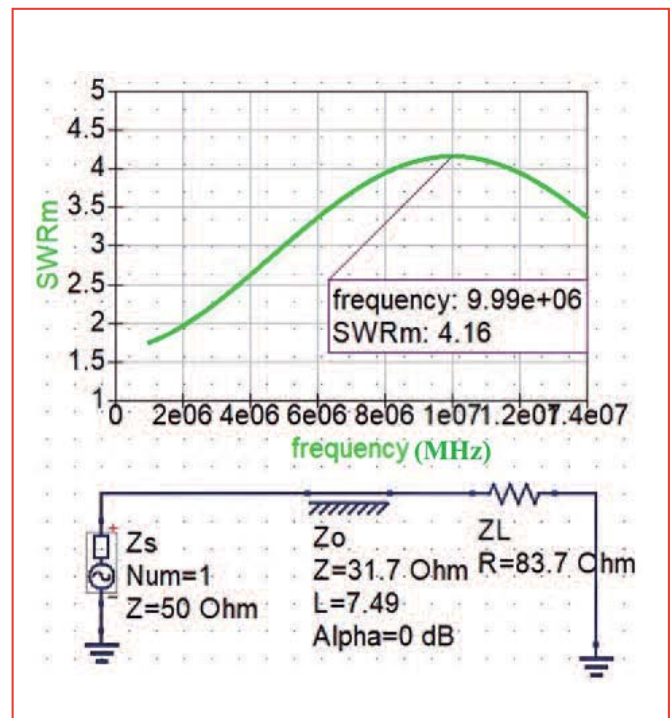


Figura 3 — Simulación numérica del experimento (ver texto).

El experimento se realizó con un trozo de coaxial desconocido y que por sus dimensiones se presumía que Z_0 era menor que 50Ω . Como carga se utilizó un resistor calibrado, tal que $Z_L = 83.7 \Omega$. Variando la fre-

frecuencia y midiendo directamente se observó que para 10 MHz el valor máximo fue " ROE_m "=4.11. Entonces, usando la ec. (6b) se obtiene $Z_0^-=31.9\ \Omega$ (el otro valor Z_0^+ no tiene sentido). A continuación, tratando de reproducir el resultado experimental en la simulación, con la misma frecuencia y con $Z_L=83.7\ \Omega$, ajustando Z_0 iterativamente, con $Z_0=31.7\ \Omega$ en la simulación se midió " ROE_m "=4.16. Estos valores son consistentes con el valor $Z_0^-=31.7\ \Omega$ que se obtiene de la ec. (6b). Finalmente, es interesante comentar que el método para determinar Z_0 con una Z_L resistiva conocida variando la frecuencia de un medidor de ROE hasta que sea $\ell=\lambda/4$, no es nuevo entre radioaficionados. Se puede ver, por ejemplo, en el libro de Joel R. Hallas, W1ZR.[5] Para eliminar el caso $Z_0 \geq Z_L$ en el análisis de los resultados, el autor propone utilizar una carga resistiva Z_L mayor que cualquier valor Z_0 esperado. Entonces considera $Z_L=125\ \Omega$, y cuatro coaxiales con los valores de Z_0 que reproducimos en la siguiente Tabla.

$Z_0\ (\Omega)$	ROE	ROE_m
35	3.6	5.2
50	2.5	2.5
75	1.7	1.1
93	1.3	1.4

La Tabla 7.1, pág. 7–11 de la Ref. 5 corresponde a las tres primeras columnas. Aquí hemos agregado la última columna con los correspondientes valores " ROE_m " que realmente medirá el instrumento. La segunda columna se puede calcular con

$$ROE = \frac{Z_L}{Z_0} = \frac{125\ \Omega}{Z_0}$$

mientras que los valores de Z_{in} de la tercera columna se calculan con Z_0/ROE , ya que

$$Z_{in} = \frac{Z_0^2}{Z_L} = \frac{Z_0^2}{Z_0 \times ROE} = \frac{Z_0}{ROE} \qquad (Z_0 \leq Z_L)$$

Según W1ZR, esto muestra que con las mediciones de ROE y de Z_{in} se podría determinar Z_0 utilizando

$$Z_0 = ROE \times Z_{in} \qquad (Z_0 \leq Z_L)$$

Sin embargo, el problema con este método (descrito en la Ref. 5) está en que las lecturas " ROE_m " del analizador en general no corresponderán con los valores ROE de la segunda columna, sino que serán los correspondientes a las ecs. (2) de este trabajo.

Referencias

[1] José Luis Giordano, CE4TW, "Lo que mide el medidor de ROE; Aplicación de las líneas con carga resistiva", RCA N°.122, enero 2026, 21-22.

[2] Ver el "transformador de cuarto de onda" en, por ejemplo, Matthew N. O. Sadiku, Elements of Electromagnetics, 7th. Ed., (Oxford University Press: New York, N.Y., 2018), 585.

[3] José Luis Giordano, CA4GIO, "SWR Applications in Lines with Resistive Loads", QST Vol.108, No.6, June 2024, 37–39.

José Luis Giordano, CA4GIO, "Aplicaciones de la ROE en líneas con cargas resistivas", Radioaficionados, julio 2024, 22–25.

[4] Qucs (Quite Universal Circuit Simulator); <https://qucs.sourceforge.net/>

[5] Joel R. Hallas, W1ZR, "Determining Transmission Line Z_0 " en Understanding Your Antenna Analyzer. A Radio Amateur's Guide to Measuring Antenna Systems, 1st. Ed., 4th. Printing, (ARRL: Newington, 2013-2020). Capítulo 7, páginas 7-10 a 7-12.