

Lo que mide el medidor de ROE

Parte 1

Aplicación de las líneas con carga resistiva

Por José Luis Giordano, CE4TW.

CÁLCULO DE LA ROE CUANDO LA CARGA ES RESISTIVA

Algunos radioaficionados encuentran intimidante las relaciones matemáticas utilizadas en la teoría de líneas de transmisión debido al uso de elementos especializados, como números complejos, carta de Smith y funciones hiperbólicas. Sin embargo, la expresión matemática de la relación de onda estacionaria, *ROE* (Standing Wave Ratio, SWR, en inglés) en una línea de transmisión con impedancia característica Z_0 (típicamente 50 Ω) que está conectada a una carga de impedancia Z_L (como una antena) se simplifica considerablemente cuando Z_L no tiene reactancia (es decir, cuando Z_L es resistiva). En efecto, en este caso particular se tiene que:

$$ROE = \frac{Z_L}{Z_0} \quad (\text{si } Z_0 \leq Z_L) \quad (1a)$$

$$ROE = \frac{Z_0}{Z_L} \quad (\text{si } Z_0 \geq Z_L) \quad (1b)$$

Demostración: Para deducir las ecuaciones (1), como punto de partida se pueden tomar las expresiones del coeficiente de reflexión ρ y de la *ROE*, del Handbook de la ARRL.[1] Generalmente, ρ es una cantidad compleja que representa la relación entre el voltaje de la onda reflejada en Z_L y el voltaje de la onda incidente (o directa) en los terminales de Z_L . Se puede demostrar que esta cantidad está relacionada con Z_L y Z_0 , según

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

Por otro lado, la *ROE* representa la relación entre la suma del máximo de voltaje de la onda incidente y el máximo de voltaje de la onda reflejada, respecto de la diferencia entre estos voltajes máximos. Luego, en la teoría de líneas de transmisión, se demuestra que la relación entre ρ y la *ROE* es

$$ROE = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|}$$

Con estas dos expresiones ya podemos demostrar directamente las ecs.(1). Consideremos entonces el caso en el que ambas impedancias no tienen reactancia, es decir, Z_0 y Z_L son números reales positivos. Supon-

gamos primero que $Z_0 \leq Z_L$, y entonces $\rho > 0$ y podemos escribir $Z_L = \alpha Z_0$ donde $\alpha \geq 1$.

Reemplazando

$$\rho = \frac{\alpha Z_0 - Z_0}{\alpha Z_0 + Z_0} = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} \geq 0$$

Luego, como $|\rho| = \rho$,

$$ROE = \frac{1 + \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1}}{1 - \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1}} = \alpha$$

es decir, obtenemos la ec. (1a).

Ahora, para demostrar la ec. (1b), suponemos entonces lo contrario: $Z_0 \geq Z_L$. Entonces $\rho < 0$ y escribimos $Z_L = Z_0/\alpha$ donde $\alpha \geq 1$. Sustituyendo como antes, obtenemos nuevamente $ROE = \alpha$, pero esta vez, obtenemos la ec. (1b).

Aunque las ecs. (1) son conocidas (ver por ejemplo, "Páginas del Principiante" en la pág. 345 de Radioaficionados de junio de 1960), parece oportuno destacar algunas consecuencias de interés para la radioafición.

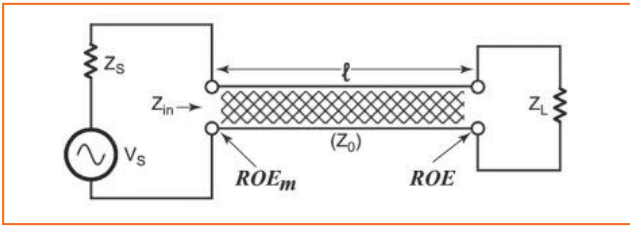
LA ROE QUE REALMENTE MEDIMOS

Al tratar de medir la *ROE* se observa que las ecs. (1) corresponden a la discontinuidad que la señal encuentra en el extremo final de la línea, entre Z_0 y Z_L (Figura 1). Sin embargo, el medidor de *ROE* del transmisor, o el medidor de *ROE* externo, o el analizador de antena, generalmente están en el otro extremo de la línea, donde todo el sistema de antena representa una carga de impedancia Z_{in} . Entonces, el valor de *ROE* que "ve" la fuente (en el lugar que realmente se realiza la medición) y que llamaremos "*ROE_m*", incluye también la posible reflexión en la entrada de la línea, es decir en la discontinuidad entre la impedancia en serie equivalente de la fuente, Z_S ($\approx 50 \Omega$), y la impedancia Z_{in} vista desde la entrada de línea.[2] A continuación, consideramos los casos en los que esta impedancia Z_{in} es resistiva. Por lo tanto, el cálculo realizado para Z_0 y Z_L se repite ahora para Z_S y Z_{in} resistivas, y análogamente resulta[3].



$$ROE_m = \frac{Z_{in}}{Z_S} = \frac{Z_{in}}{50 \Omega} \quad (\text{si } Z_S = 50 \Omega \leq Z_{in}) \quad (2a)$$

$$ROE_m = \frac{Z_S}{Z_{in}} = \frac{50 \Omega}{Z_{in}} \quad (\text{si } Z_S = 50 \Omega \geq Z_{in}) \quad (2b)$$



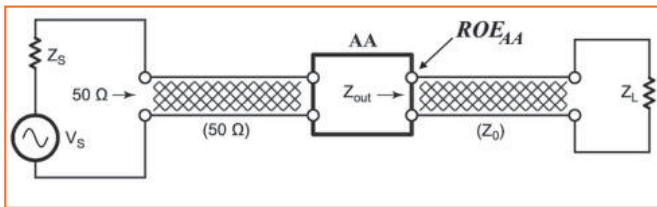
Esquema de la fuente conectada a la carga a través de una línea de transmisión.

En el caso particular de una línea adaptada a la carga ($Z_0 = Z_L$), no hay reflexión entre la línea y la antena ($ROE = 1.0$) y se tiene $Z_{in} = Z_L$ independientemente de la longitud l de la línea (como si la línea no estuviese).

Entonces, la reflexión puede ocurrir sólo en la entrada de la línea cuando sea $Z_0 = Z_L \neq 50 \Omega$. En efecto, si fuese $Z_0 = Z_L = 50 \Omega$ o, sería $Z_{in} = 50 \Omega$ y entonces $ROE_m = 1.0$. Sin embargo, si es $Z_0 = Z_L = 75 \Omega$ por ejemplo, será $Z_{in} = 75 \Omega$ y se mediría $ROE_m = 75/50 = 1.5$ debida a la reflexión en la entrada, entre el transmisor y la línea.

RANGO DE OPERACIÓN DE UN 'ACOPLADOR DE ANTENA'

Consideremos ahora que entre la fuente de señal y la impedancia Z_L existe un acoplador de antena, AA (sintonizador de antena, tuner o transmatch). La entrada del AA está conectada a la fuente a través de un coaxial de 50Ω (Fig. 2). En condiciones de adaptación perfecta el AA tiene 50Ω en su entrada, y entonces la fuente ahora ve $Z_{in} = 50 \Omega$ en la entrada del coaxial. Por otro lado, el AA ve una impedancia Z_{out} en su salida, que depende de Z_0 y Z_L y que en general no es resistiva (incluso cuando Z_L lo sea).



Esquema de fuente conectada a la carga con línea a través de un acoplador de antena (AA) con un coaxial de 50Ω .

Nuevamente, cuando Z_{out} sea resistiva, la ROE en la salida del acoplador, que denominamos ROE_{AA} , se puede expresar como antes:

$$ROE_{AA} = \frac{Z_{out}}{50 \Omega} \quad (\text{si } 50 \Omega \leq Z_{out}) \quad (3a)$$

$$ROE_{AA} = \frac{50 \Omega}{Z_{out}} \quad (\text{si } 50 \Omega \geq Z_{out}) \quad (3b)$$

Hay algunos modelos de acopladores de antena cuyos manuales de instrucciones y especificaciones no indican el rango de impedancia mínima Z_0^- e impedancia máxima Z_0^+ con el que pueden funcionar. En cambio, solo especifican el rango de ROE en el que pueden realizar la adaptación (con la máxima potencia). Aunque los acopladores adaptan cargas con componentes reactivas, el rango de operación generalmente lo especifican para una carga resistiva. Entonces, para conocer el rango de impedancias que adapta el AA es suficiente invertir las relaciones anteriores:

$$Z_{out}^+ = ROE_{AA} \times 50 \Omega \quad (\text{si } 50 \Omega \leq Z_{out}^+) \quad (4a)$$

$$Z_{out}^- = \frac{50 \Omega}{ROE_{AA}} \quad (\text{si } 50 \Omega \geq Z_{out}^-) \quad (4b)$$

Veamos algunos ejemplos.

(a) El acoplador automático incorporado en el transceptor Xiegu G90 puede adaptar impedancias con una " ROE de hasta 5:1", que, usando las ecs. (4), se ve que corresponde al rango 10–250 Ω .

(b) Según las especificaciones, el acoplador de antena automático externo LDG Z-100A puede adaptar con una " ROE de hasta 10:1". Luego, usando las ecs. (4), vemos que este acoplador adapta en el rango 5–500 Ω .

(c) En el manual básico del transceptor Icom IC-7300 se muestra el rango de operación del acoplador automático incorporado de ambas formas: "16.7–150 o (ROE hasta 3:1)". Luego, la consistencia de esta información se puede verificar con las ecs. (4).

Finalmente, como en los extremos de la línea son puntos donde puede haber reflexiones, es importante destacar que si la principal desadaptación está cerca del transmisor, entre $Z_S = 50 \Omega$ y Z_{in} , es mejor que el AA esté en la salida del transmisor. Sin embargo, cuando las reflexiones se deben principalmente a la desadaptación en la antena, entre Z_0 y Z_L , hay menos pérdidas cuando el AA se coloca cerca de la alimentación de la antena. Como generalmente esto no se hace (ya que habría que operar el AA de forma remota), entonces es importante que la línea con Z_0 esté en buen estado y tenga pocas pérdidas, es decir, que sea lo más corta posible, que tenga el mayor diámetro posible (tipo RG8 y no RG58), que sea del tipo "low loss" (tipo LMR-400 o RG-8X, y no RG-8 o RG-58) y que sea un cable "de marca", de la mejor calidad posible. Mientras más larga sea la línea, más relevante será todo esto.

REFERENCIAS

- [1] H.W. Silver, N0AX (Ed.), The ARRL Handbook for Radio Communications 2023 100th Ed. (ARRL: Newington, CT, 2022), p.20.5.
- [2] Ver, por ejemplo, David M. Pozar, Microwave engineering, 4th Ed. (John Wiley & Sons: Hoboken, N.J., 2012), "Generator and load mismatches", p.76.
- [3] José Luis Giordano, CA4GIO, "SWR Applications in Lines with Resistive Loads", QST, June 2024, 37–39. José Luis Giordano, CA4GIO, "Aplicaciones de la ROE en líneas con cargas resistivas", Radioaficionados, julio 2024, 22–25.