IC323 Comunicación de Datos

Unidad N°3:
Propagación en Medios Guiados

Dr. Ing. Javier Ernesto Kolodziej
(*profesor responsable*)
Dr. Ing. Sergio Eduardo Moya
(*profesor adjunto*)
Ing. Luis Urbani
(*profesor jefe de trabajos prácticos*)

Líneas de Transmisión

- Requerimientos primarios:
  - **Introduce mínima atenuación a la señal**
  - **Las señales no son radiadas**
  - **Minimizar el ruido capturado**

Longitudes de Onda de un Cable

- Un par de conductores de corriente no se consideran líneas de transmisión a menos que tenga una longitud superior a $0{,}1\lambda$ a la frecuencia de la señal.
- Ejemplo de longitudes de onda considerando la velocidad de la luz como velocidad de propagación:
  - **Para 50Hz:** $\lambda = \frac{300.000.000\ [m/s]}{50[1/s]} = \mathbf{6.000.000}\ [\boldsymbol{m}]$.
  - **Para 3MHz:** $\lambda = \frac{300.000.000\ [m/s]}{3.000.000[1/s]} = \mathbf{100}\ [\boldsymbol{m}]$.
  - **Para 50MHz:** $\lambda = \frac{300.000.000\ [m/s]}{50.000.000[1/s]} = \mathbf{6}\ [\boldsymbol{m}]$.
- En la medida que las frecuencias crecen, las longitudes de onda disminuyen
- Además, la velocidad de propagación en un cable es menor que la de la luz (de 0,5 a 0,95 veces). Es decir, se reduce aún más la longitude de onda

Factor de Velocidad

- Establece una relación entre la velocidad de propagación y la velocidad de la luz:

$$FV = \frac{v_p}{c}$$

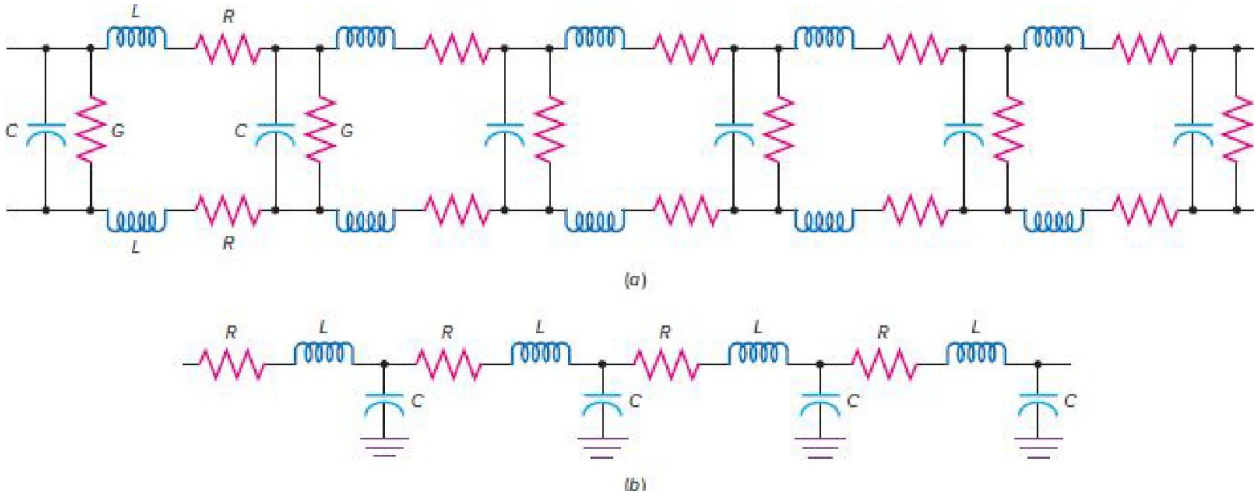
- Depende principalmente del material dieléctrico utilizado
  - **Por ejemplo: una línea de transmisión abierta tiene un FV = 0,90**
  - **Un cable de antena plano, alrededor de 0,8**
  - **Un cable coaxial, alrededor de 0,66**

Type of cable	Z_0, Ω	VF, %
RG-8/U	52	66
RG-8/U foam	50	80
RG-11/U	75	66
RG-11/U foam	75	80
RG-58A/U	53.5	66
RG-59/U	73	66
RG-62A/U	93	86
RG-214/U	50	66
9913	50	84
Twin-lead (open-line)	300	82

*At 100 MHz.

Comportamiento Eléctrico de las Líneas de Transmisión

- Cuando la longitud del cable es mayor a la de la longitud de onda y ya no se puede considerar que todo el circuito está a la misma tensión, existen entonces ondas estacionarias o variaciones de corriente a lo largo de la longitud.
- Surge un modelo de parámetros distribuidos que representa efectos inductivos y capacitivos, además de la resistencia de los conductores y fugas en la aislación
-



Comportamiento Eléctrico de las Líneas de Transmisión

- En estas circunstancias, la onda transmitida va interactuando por sectores con la línea. Cobra relevancia el concepto tiempo de propagación
- Tres conceptos que parecen similares comienzan a diferenciarse notablemente:
  - **Impedancia Equivalente**
  - **Impedancia Característica**
  - **Impedancia de Entrada**

Impedancia Característica

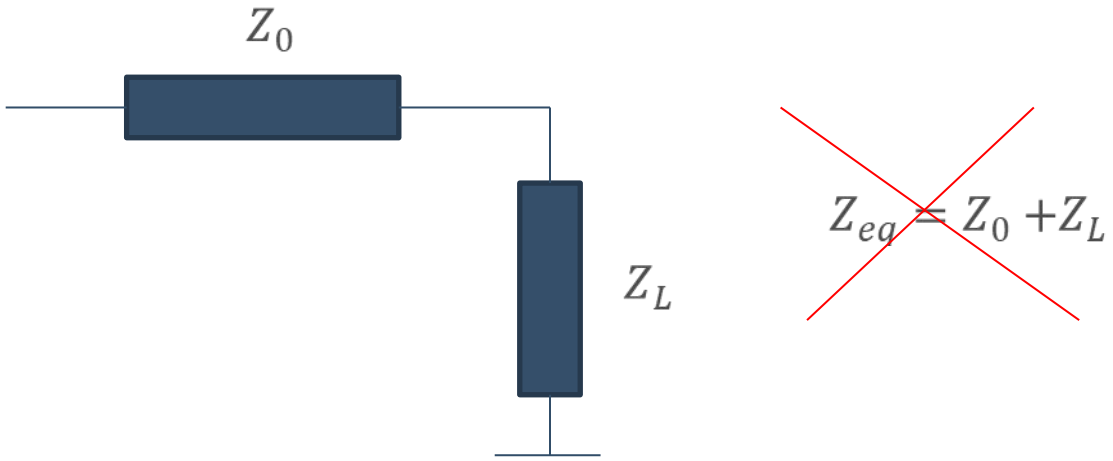
- Es la relación de las amplitudes de la tensión y la corriente de una onda propagándose a lo largo de la línea.
- Está determinada por la geometría y materiales de la línea de transmisión y, para una línea uniforme, no depende de su longitud.
- También se puede considerar como la impedancia de entrada de la línea de transmisión considerando una longitud infinita
- La ecuación que la define es:

$$Z_o = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}\,[\Omega]$$

R es la resistencia serie, L la inductancia, G la conductancia paralela y la capacitancia, todo por unidad de longitud (pero la unidad de longitud se cancelan)

- Se puede simplificar como: $Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}}$ (completamente resistiva)

Circuito Equivalente



- El circuito equivalente solo es la suma de la impedancia característica y la de la carga cuando no hay línea de transmisión
- Es decir, cuando el circuito es tan corto que la Fuente interactúa con todos los componentes de forma simultánea
- Solo ocurre a frecuencias muy bajas o CC
- Para propósitos prácticos, cuando se lidia con una línea de transmisión, esta relación no es válida

Impedancia de Entrada

- En cada tiempo dado, la señal interactúa solo con la impedancia característica o con la carga. No necesariamente las dos de forma simultanea
- Solo en el punto donde se unen la línea de transmisión y el generador, deben ser consideradas de forma simultanea bajo el concepto de impedancia de entrada.
- La impedancia de entrada no es una impedancia equivalente

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \tanh(\gamma l)}{Z_0 + Z_L \tanh(\gamma l)}$$

γ es la constante de propagación y depende de la frecuencia,

l es la longitud de la línea

Adaptación de Impedancias

- Cuando la impedancia de carga coincide con la característica:

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \tanh(\gamma l)}{Z_0 + Z_L \tanh(\gamma l)} = Z_0 \frac{Z_0 + Z_0 \tanh(\gamma l)}{Z_0 + Z_0 \tanh(\gamma l)} = Z_0$$

- Esta condición es llamada adaptación de impedancia

- También se puede llegar a un resultado similar cuando la longitud de la línea de transmisión se hace suficientemente larga (tiende a infinito) la $tanh$ tiende a 1 y la impedancia de entrada coincide con la impedancia característica

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \tanh(\gamma l)}{Z_0 + Z_L \tanh(\gamma l)}$$

Impedancia Característica

- Si la impedancia característica, la de carga y la del generador coinciden, existe adaptación de impedancias y se alcanza la máxima transmisión de potencia.
- Un medidor de impedancias o puente puede utilizarse para medir la inductancia o capacitancia de una sección de la línea de transmisión.
- La impedancia característica de un cable es independiente de la longitud
- Para longitudes de cable menores a un décimo de la longitud de onda, la impedancia característica no importa.
- Lossless (zero-resistance) line is assumed

Ejemplos de Impedancias Características

Standard	Impedancia (Ω)	Tolerancia
Ethernet Cat.5	100	±5Ω
USB	90	±15%
HDMI	95	±15%
IEEE 1394	108	+3% a -2%
VGA	75	±5%
DisplayPort	100	±20%
DVI	95	±15%
PCIe	85	±15%
Overhead power line	400	Típico
Underground power line	40	Típico

Cálculo de la Velocidad de Propagación

- Si la impedancia característica, la de carga y la del generador coinciden, existe adaptación de impedancias y se alcanza la máxima transmisión de potencia.
- $v_p = \frac{l}{\sqrt{LC}}$

Constante de Propagación

- La constante de propagación se define como:

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

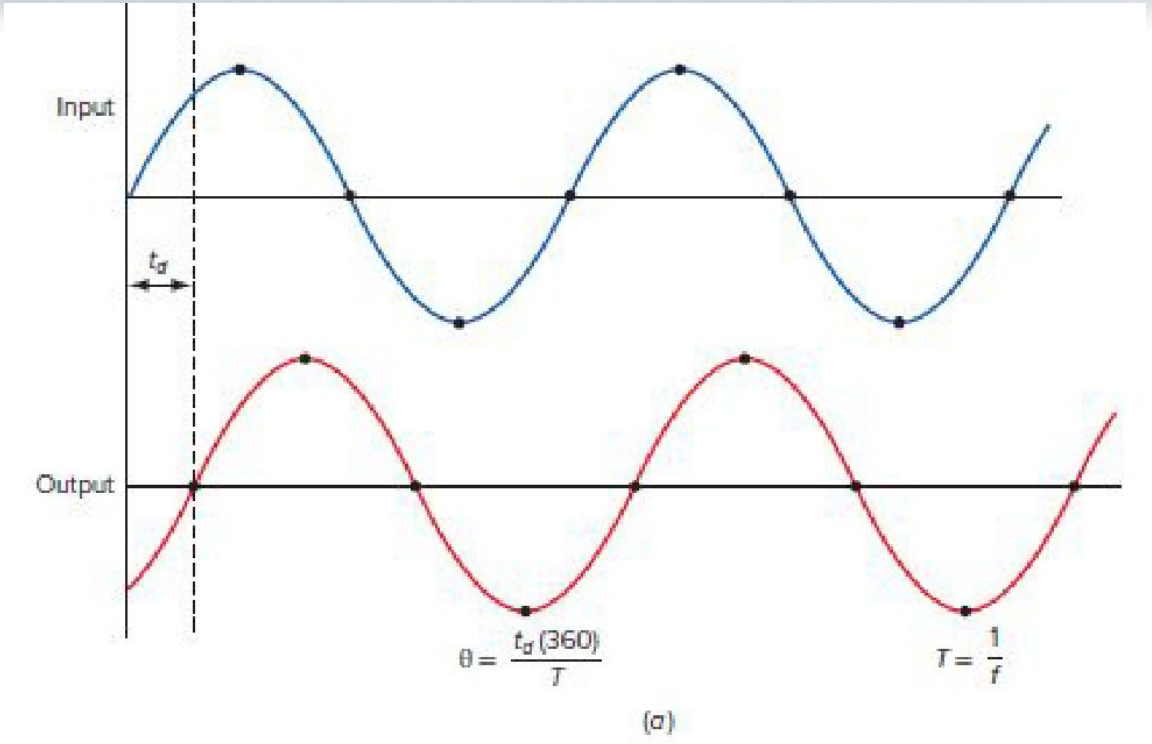
En realidad es el número de onda (*wave number*). Recordar mecánica de ondas o propagación de ondas.

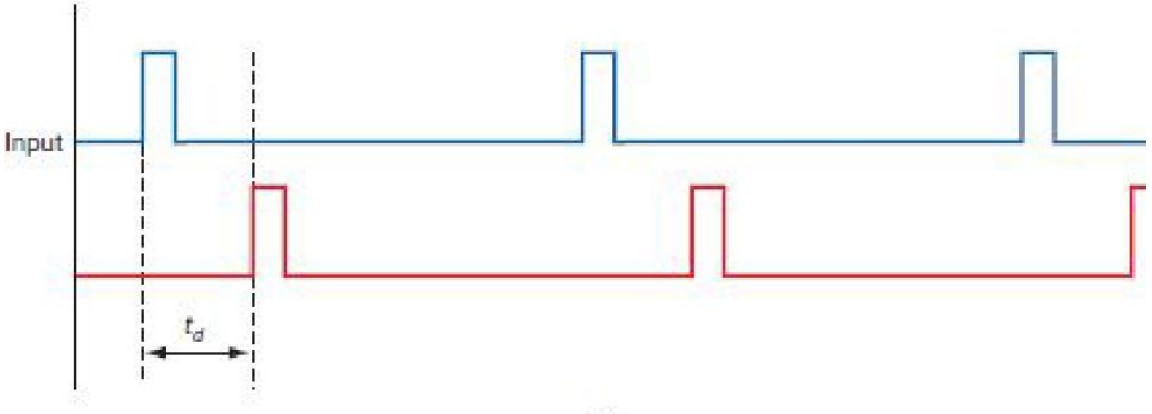
Se puede verificar que $\frac{\gamma}{\omega} = \frac{1}{v_p}$

- $v_p = \frac{l}{\sqrt{LC}}$

Tiempo de retardo (Time Delay)

- Definición:



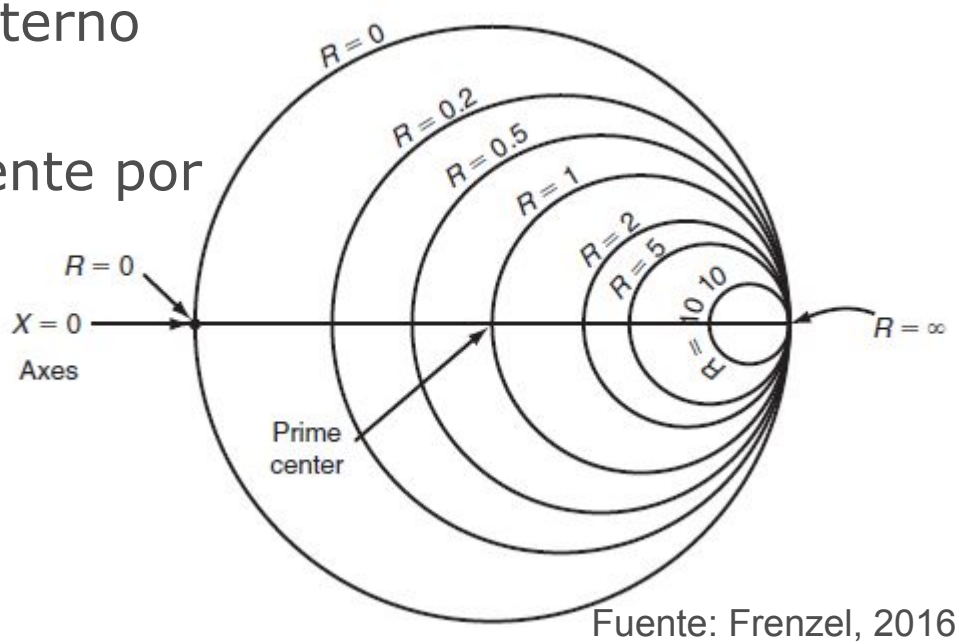


Carta de Smith

- La matemática necesaria para analizar y diseñar una línea de transmisión es compleja
- Surgió como una forma de cálculo de las líneas de transmisión
- Hoy en día existen diversos recursos de cálculo más eficientes
- Sin embargo, la carta de Smith se sigue utilizando ya que provee una vía estandarizada de interpretar y resolver líneas de transmisión y problemas relacionados.
- Es la gráfica de dos conjuntos de círculos ortogonales (a ángulos derechos) en un tercer círculo

Carta de Smith

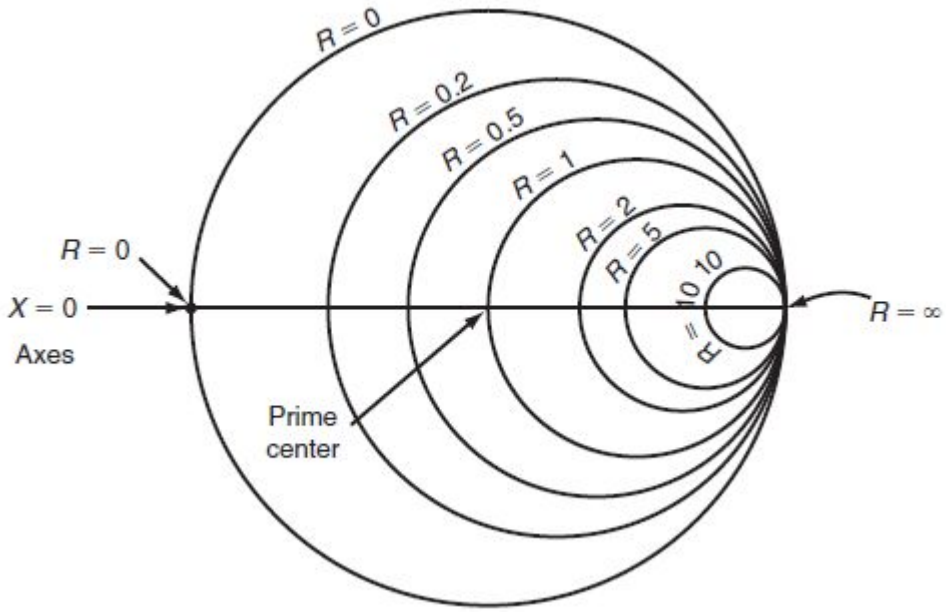
- El primer paso es graficar un conjunto de círculos excéntricos a lo largo de una línea horizontal
- El eje horizontal representa la resistencia pura o 0 reactancia
- El punto más lejano a la izquierda representa resistencia 0, y el situado más a la derecha, resistencia infinita
- Cada círculo representa todos los puntos de un valor fijo de resistencia
- Todos los puntos en el círculo externo representan 0 Ω
- El círculo de R=1 pasa exactamente por el centro del eje horizontal, y es llamado centro primario



Fuente: Frenzel, 2016

Carta de Smith

- Las líneas de transmisión más comúnmente utilizadas son de 50Ω, por ello, es conveniente que esté en el centro primario
- De hecho, la carta de Smith es un diagrama normalizado, utilizando de referencia el valor más conveniente para el usuario.



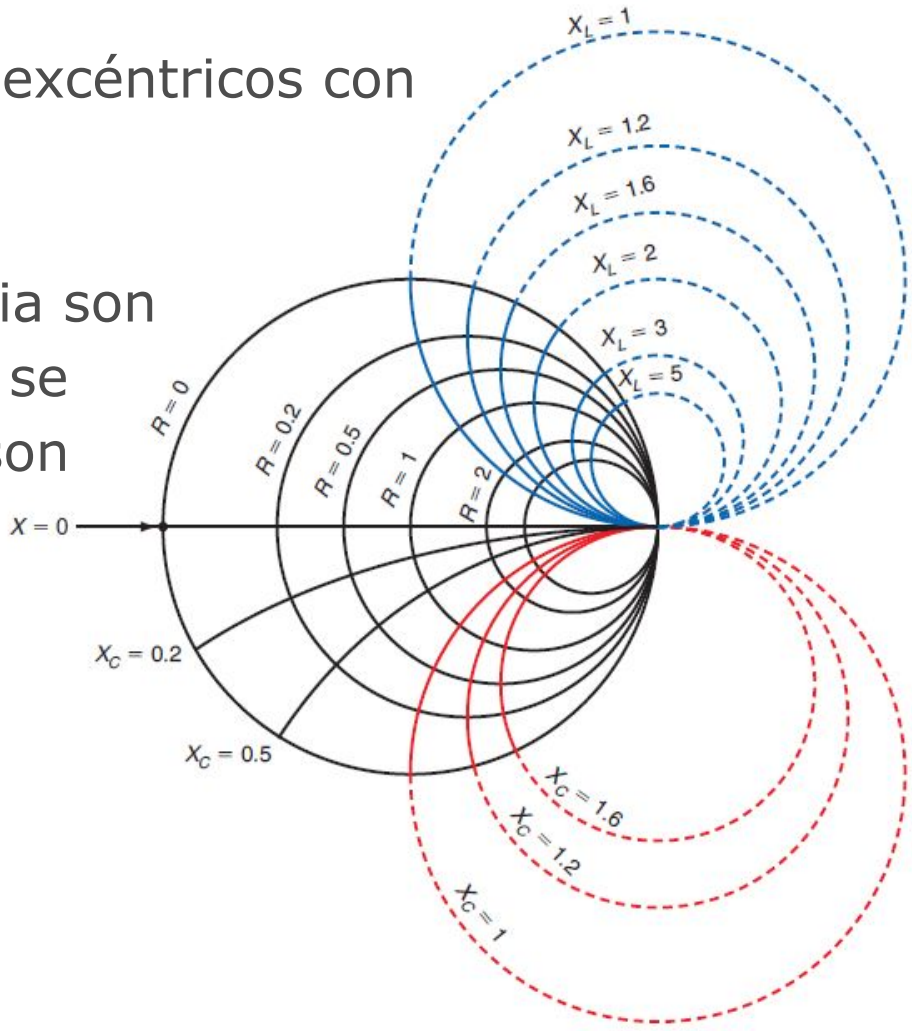
Fuente: Frenzel, 2016.

Carta de Smith

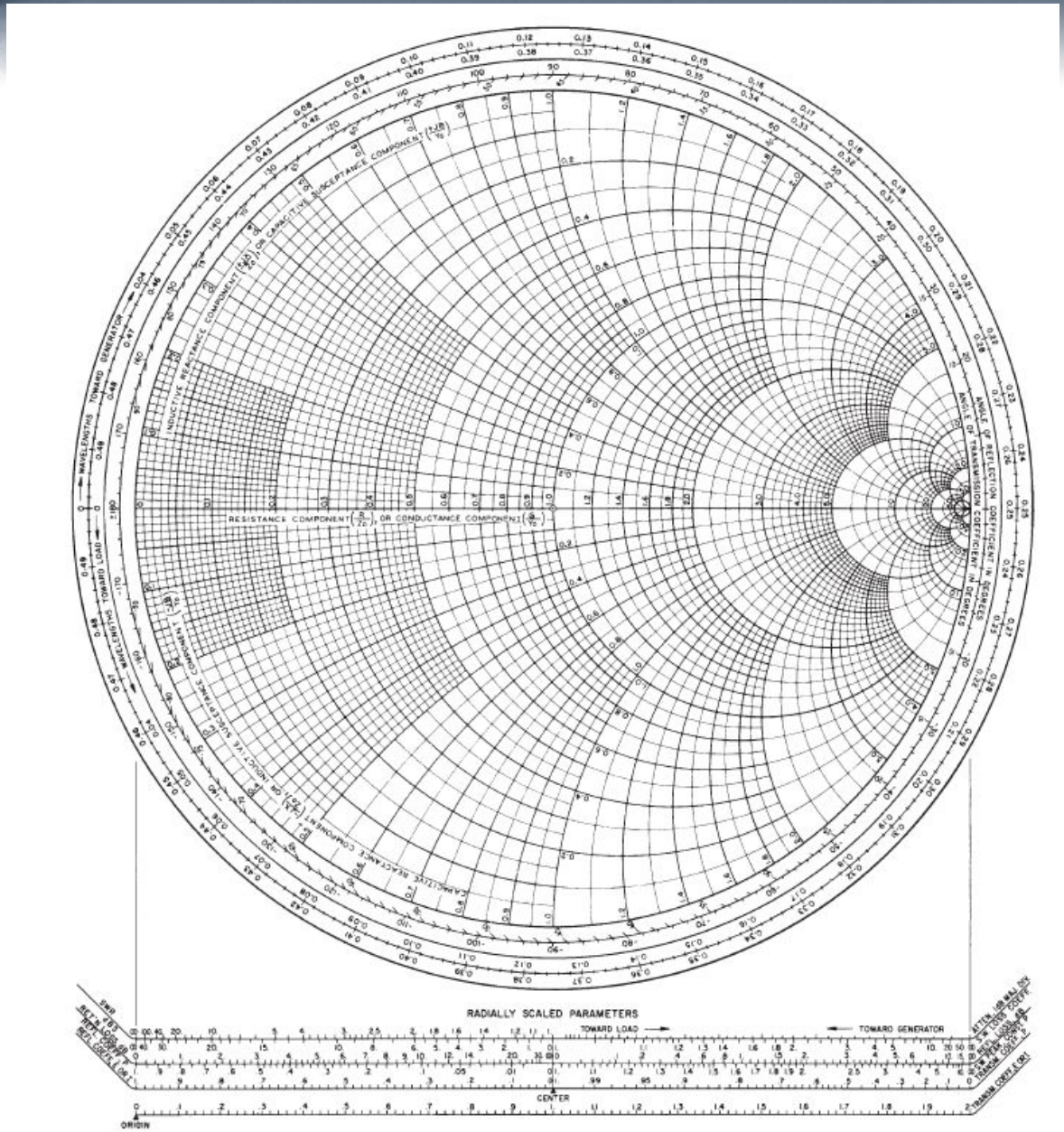
- La carta de Smith se completa con los círculos de reactancia

- Al igual que las resistencias, son excéntricos con todos los círculos coincidiendo en ∞

- Note que los círculos de reactancia son incompletos, sólo las porciones que se encuentran dentro del círculo R=0 son consideradas en la carta de Smith

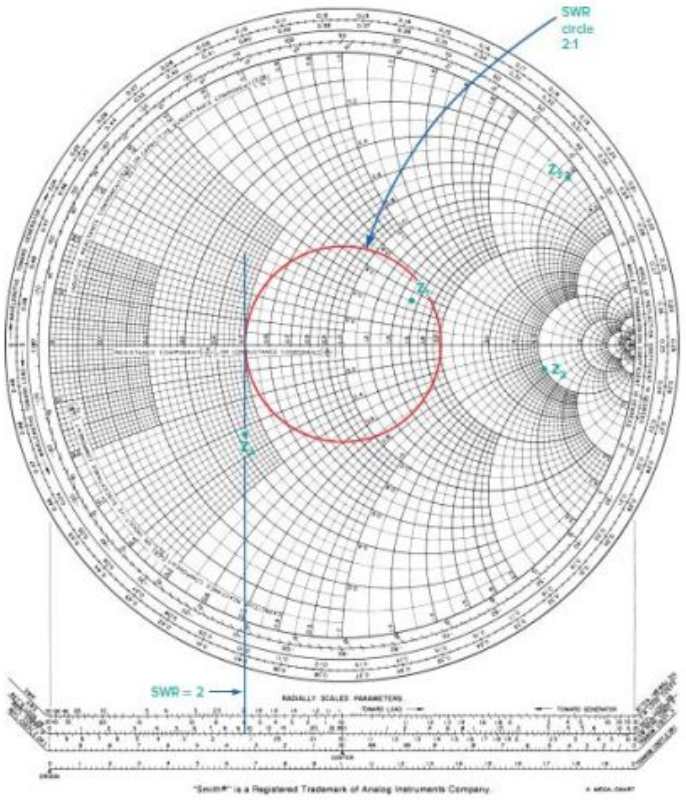


Carta de Smith completa



Carta de Smith: Actividad

Determinar los valores de las impedancias indicadas como Z1, Z2, Z3 y Z4 en la carta de Smith considerando que el valor del centro principal es 50Ω



Carta de Smith: Escalas de Longitud de Onda

- Las tres escalas en el perímetro externo de la carta de Smith son:
  - **a) Longitud de onda hacia el generador**
  - **b) Longitud de onda hacia la carga**
  - **c) El ángulo del coeficiente de reflexión medido en grados**

a) Hacia el generador: comienza en la línea de resistencia y reactancia 0, y se mueve en el sentido horario hacia el ∞. Un medio de una rotación circular es 90°, y en esta carta, representa ¼ longitud de onda. Una rotación completa es media longitud de onda. En líneas de transmisión, los patrones de distribución de corrientes y tensiones se repiten cada media longitud de onda.

b) Hacia la carga: También comienza en cero pero avanza en el sentido antihorario.

c) Coeficiente de reflexión: es la relación entre la tensión de la onda reflejada y la incidente. Va de 0 a 1, pero también se

Carta de Smith: Círculo ROE

- La ROE graficada en la carta de Smith es un círculo

- Si la carga es resistiva y coincide con la impedancia característica de la línea (impedancia adaptada), la relación de onda estacionaria es 1. Esto es graficado como un simple punto en centro primario de la carta de Smith (la impedancia de la línea es plana en 50Ω o cualquier otro valor de la normalización)

- Sin embargo, si la carga no está perfectamente adaptada a la impedancia primaria, existirán ondas estacionarias. La ROE en ese caso es representada por un círculo cuyo centro es el centro primario

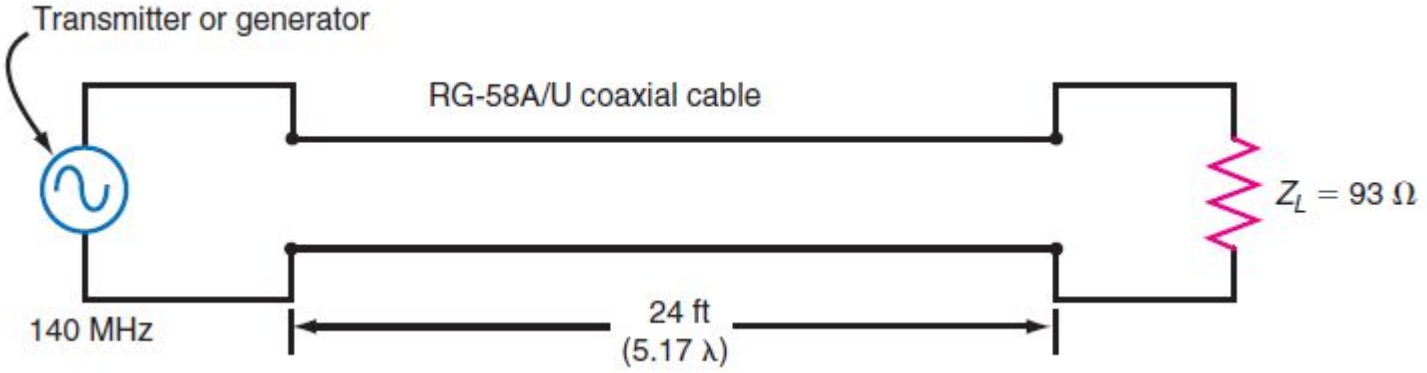
- Para graficar un círculo de ROE, primero calcular el ROE con las fórmulas dadas. Por ejemplo, asumiendo una ROE=2, marcar un círculo con ese rango.

Carta de Smith: Círculo ROE

- Las variaciones en la tensión y corriente de la onda estacionaria, significan que hay una variación continua en la impedancia a lo largo de la línea.
- En otras palabras, la impedancia en un punto de una línea no adaptada es diferente a todos los otros puntos de la línea (dentro del rango de media longitud de onda).
- Todos los valores de impedancia aparecen en el círculo de ROE.
- También se puede interpretar como la impedancia de entrada para diferentes frecuencias (expresadas en función de la longitud de onda)

Carta de Smith: Ejemplo 1

- La frecuencia de operación de una pieza de cable coaxial (RG-58A/U) de 7,3152 m. (24 ft) es 140 MHz. La carga es una resistencia de 93 Ω ¿Cuál es la impedancia vista por el transmisor?



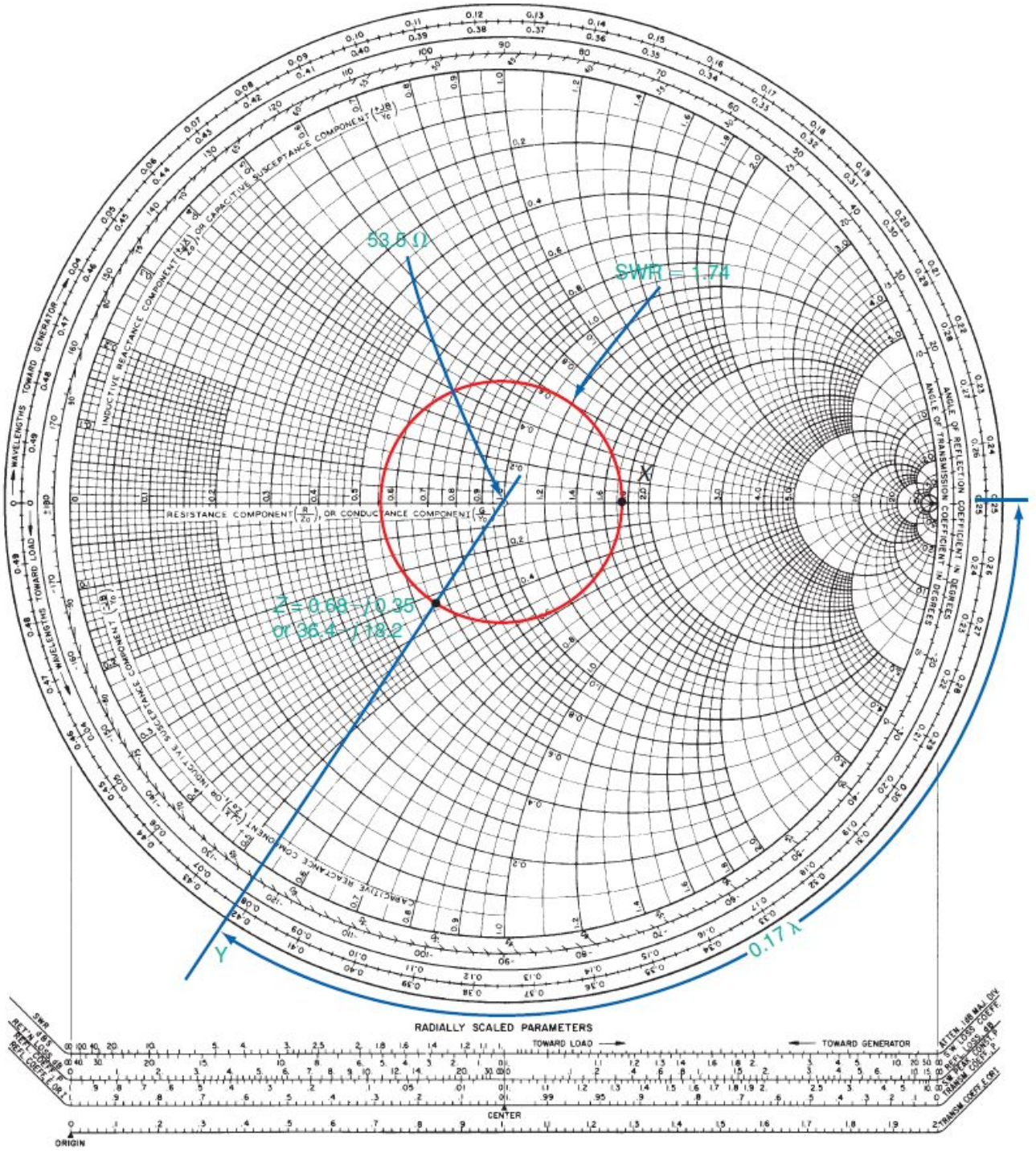
El primer paso es encontrar el número de longitudes de onda representados por la longitud del cable:

La longitud de onda en ese cable coaxial es: $\lambda = \frac{c}{f} VF = \frac{300.10^6}{140.10^6} 0{,}66 = 1{,}414\ m.$

Su longitud equivalente resulta: $\frac{L}{\lambda} = \frac{7{,}3152}{1{,}414} = 5{,}17$

La variación de la impedancia a lo largo de una línea se repite cada media longitud de onda (y por lo tanto, cada longitud de onda completa también).

Así, por propósitos de cálculo, solo necesitamos 0,17λ del valor 5,17λ.



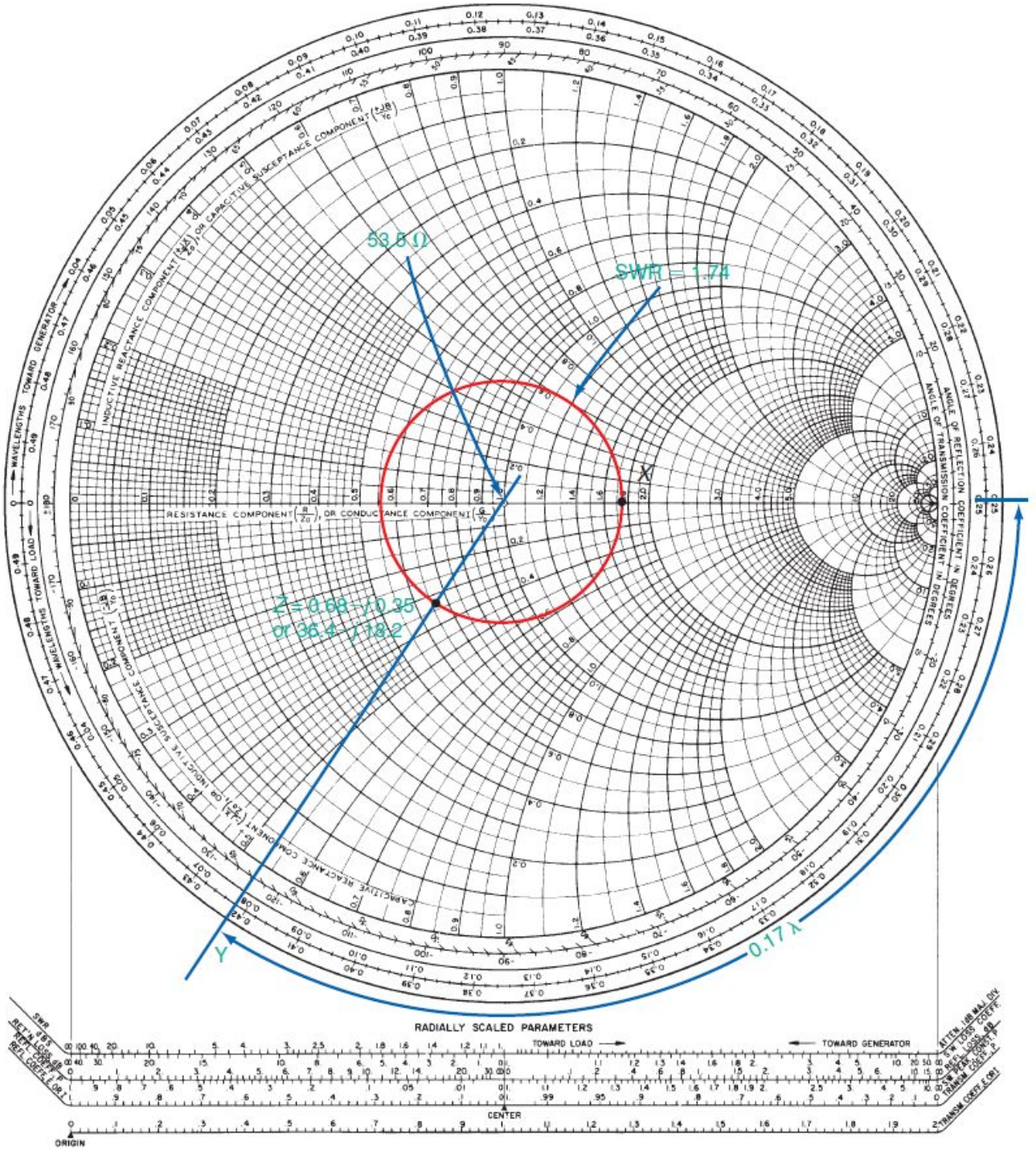
Se normaliza la carta de Smith con la impedancia característica del cable coaxial, que es 53,5 Ω (valor del centro primario).

La ROE se calcula como:

$$ROE = \frac{Z_L}{Z_0} = \frac{93}{53{,}5} = 1{,}74$$

La ROE es graficada en rojo, donde el punto X representa

la carga resistiva de 93 Ω

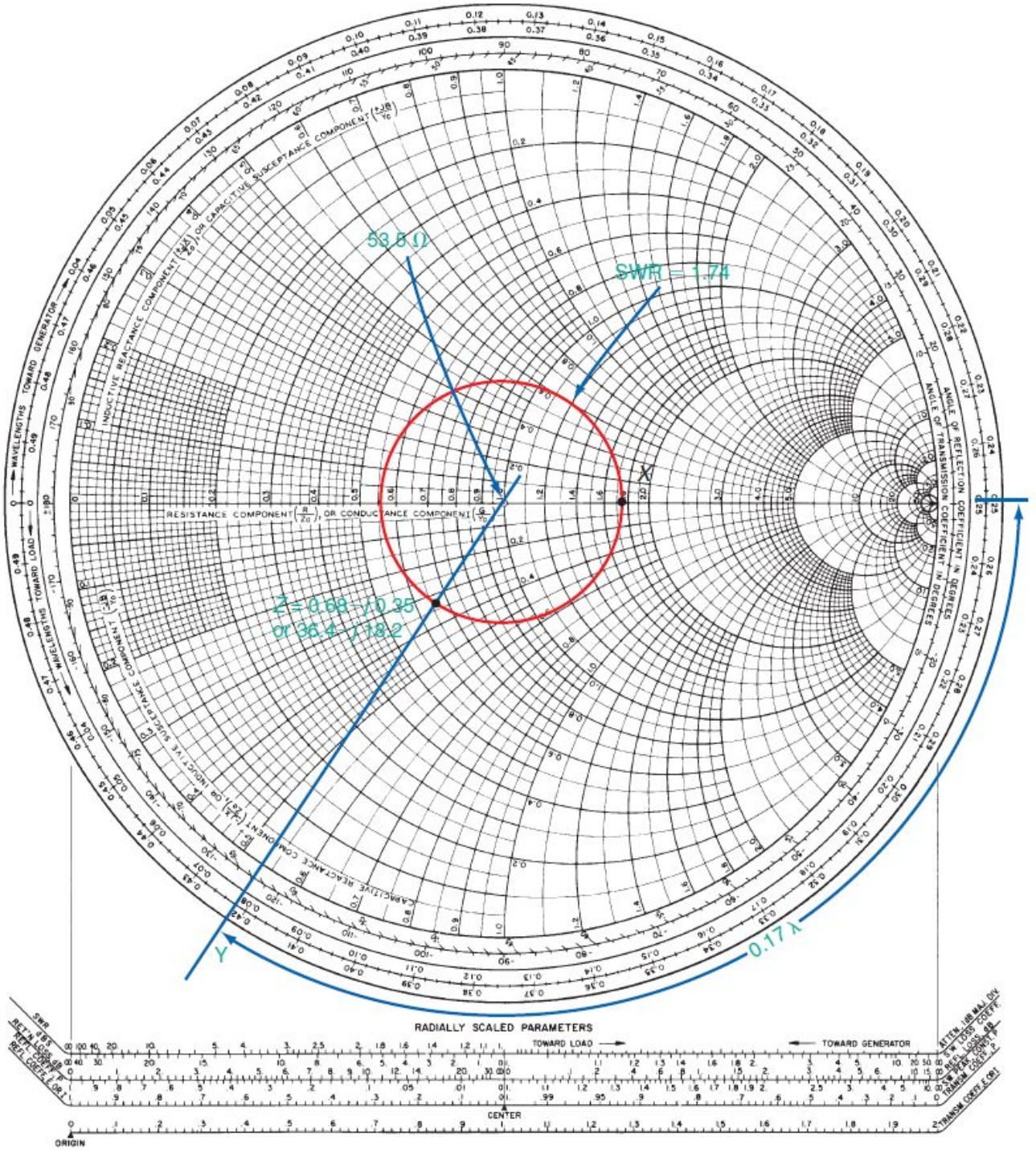


Para encontrar la impedancia en el extremo del transmisor, nos movemos en la línea de transmisión 5,17 λ desde la carga hacia el transmisor.

Comenzando en el punto X, girando sobre el círculo de ROE en sentido horario 10 veces (5λ) y luego 0,17 λ

El valor que resulta es: R ≈ 0,68 Ω y

Xc ≈ 0,35 Ω (norm.)

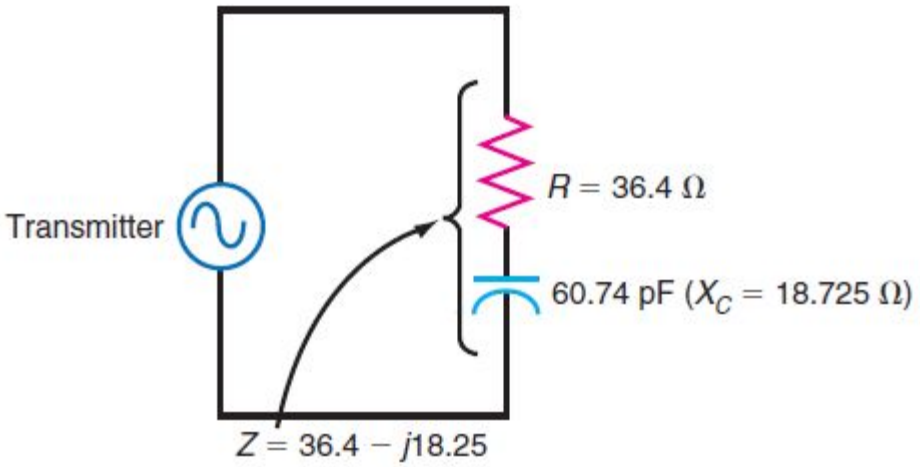


Carta de Smith: Ejemplo 1

- Desnormalizando la impedancia de entrada resulta:

$$Z = 53{,}5\ (0{,}68 - j0{,}35) = (36{,}4 - j18{,}725)\ \Omega$$

El circuito equivalente es:



Carta de Smith: Ejemplo 2

- Una antena es conectada al cable del Ejemplo 1. Corresponde a una carga de $(40 + j30\ )\Omega$ ¿Cuál es la impedancia que ve el transmisor?

Solución:

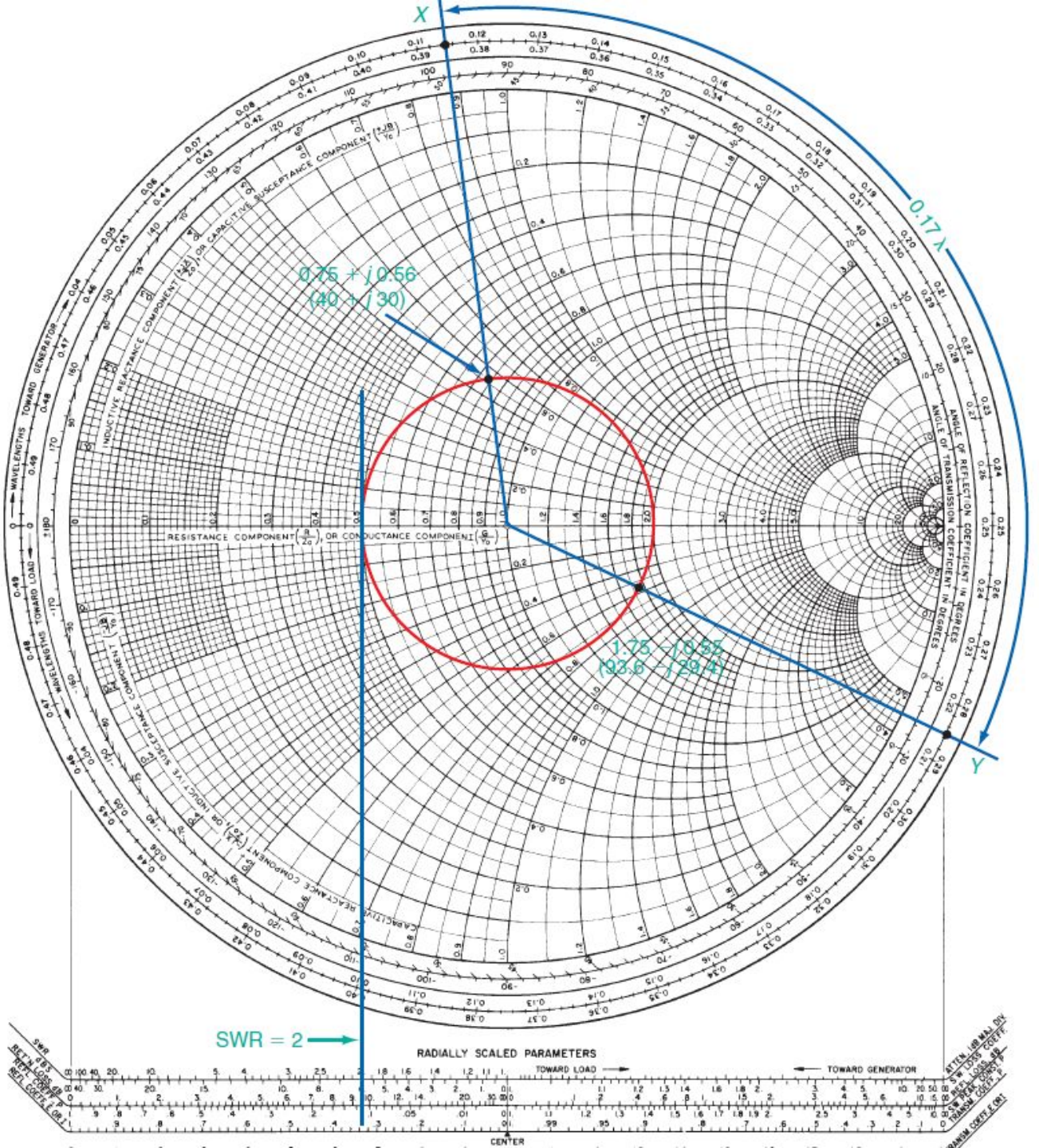
El centro primario sigue siendo $53{,}5\Omega$, Así que corresponde normalizar la carga a este valor:

$$Z_L = \frac{(40 + j30\ )\Omega}{53{,}5} = (0{,}75 + j\ 0{,}56)\Omega$$

Este valor se ubica en la carta y a partir de él se traza el círculo de ROE. Proyectando sobre la línea SWR, da aproximadamente 2:1.

El siguiente paso es dibujar una línea desde el centro primario hacia la carga (punto X) y usarlo como punto de partida para hacer un giro sobre el circulo de ROE en 0,17 λ (punto Y)

Trazando una recta desde Y hasta el centro primario, se obtiene la impedancia de entrada en la intersección con el círculo de ROE. Resultando el valor normalizado:
(1,75 - *j* 0,55)Ω
Desnormalizando:
Z = 53,5(1,75 - *j* 0,55)
= (93,6 - *j* 29,4) Ω

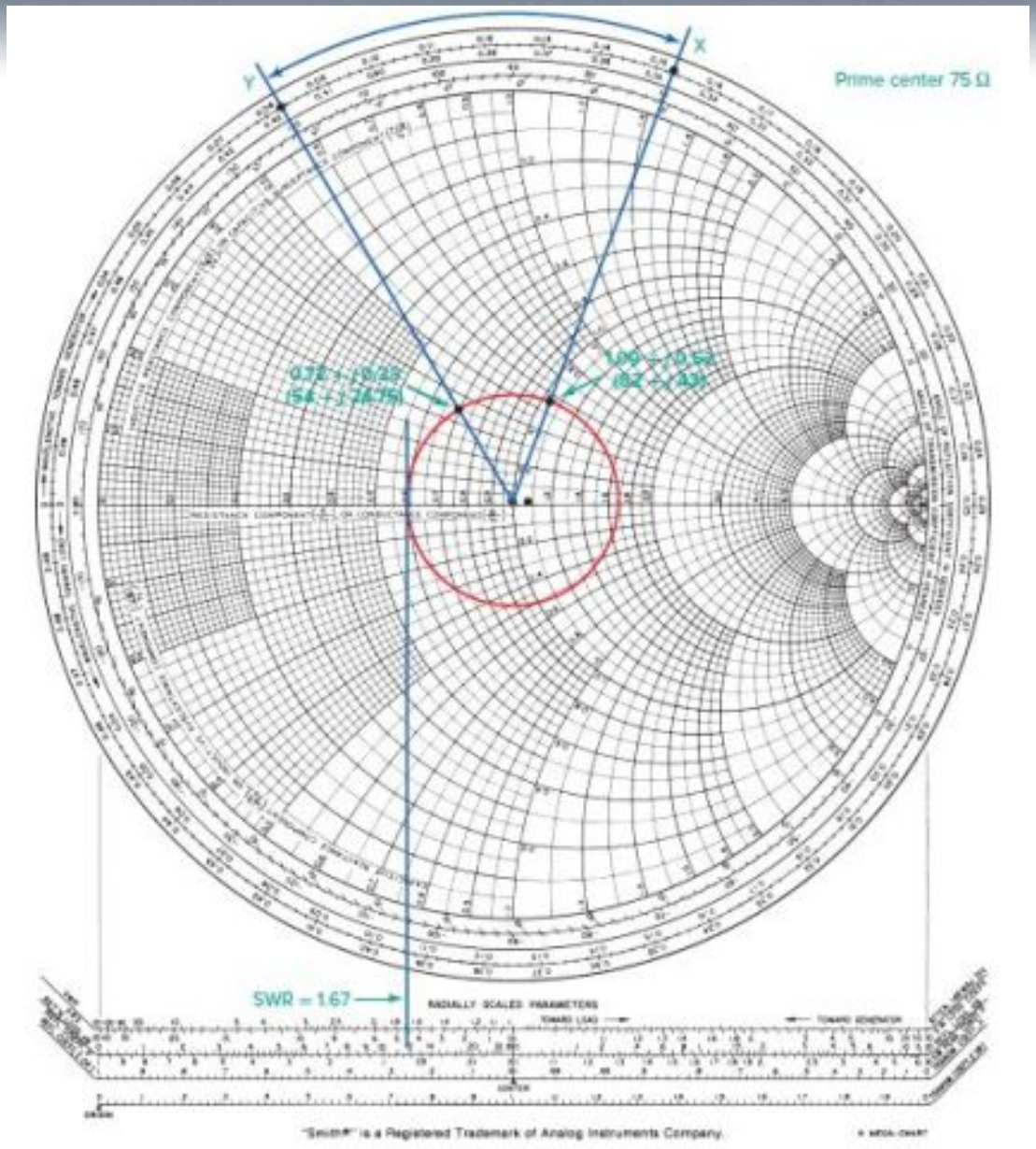


Carta de Smith: Ejemplo 3

Un cable coaxial de 15,24 metros RG-11/U con dieléctrico de espuma con una impedancia característica de 75Ω y un factor de velocidad de 0,8 tiene una frecuencia de operación de 72MHz. La carga es una antena cuya impedancia actual se desconoce. Una medición en el extremo del transmisor del cable da una impedancia compleja de 82 + j43. ¿Cuál es la impedancia de la antena?

- Una longitud de onda a 72MHz es 300/72 = 4,17 m
- Al tener en cuenta el fv resulta λ = 3,33 m

Carta de Smith: Ejemplo 3

- La longitud del cable coaxial de 15,24 m expresado en longitudes de onda resulta: 15,24 / 3,33 = 4,57
  Esto equivale a 9 vueltas en la carta de Smith y un resto de 0,07.
- Se considera un centro principal en 75 Ω (impedancia característica), así, la impedancia medida en el extremo del transmisor se normaliza a:

Carta de Smith: Ejemplo 3