

Aplicación de MATLAB® en el análisis de circuitos de RF

Propagación y Radiación

Universidad Nacional del Sur

3 de mayo de 2023



Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Adaptación de impedancias:
transformador de $\lambda/4$
- 3 Adaptación de impedancias:
elementos concentrados
- 4 Adaptación de impedancias:
stub simple y doble

Sección 1

Introducción

Ejemplo de aplicación

Trabajo Práctico 3, Ejercicio 6

Dados los siguientes tres elementos (concentrados):

$$R = 300 \, \Omega, \, L = 2.2 \, \mu\text{Hy}, \, C = 3 \, \text{pF}$$

representar en el ábaco la impedancia vista en terminales (suponiendo que se conectan a una línea de $Z_0 = 50 \, \Omega$) tomando 5 puntos entre 50 y 700 MHz, conectando dichos elementos en a) serie y b) paralelo.

$$Z_s = \frac{-\omega^2 LC + j\omega RC + 1}{j\omega C} \quad (1)$$

$$Z_p = \frac{j\omega L}{-\omega^2 LC + j\omega \frac{L}{R} + 1} \quad (2)$$

Ejemplo de aplicación

Trabajo Práctico 3, Ejercicio 6

Dados los siguientes tres elementos (concentrados):

$$R = 300 \, \Omega, \, L = 2.2 \, \mu\text{Hy}, \, C = 3 \, \text{pF}$$

representar en el ábaco la impedancia vista en terminales (suponiendo que se conectan a una línea de $Z_0 = 50 \, \Omega$) tomando 5 puntos entre 50 y 700 MHz, conectando dichos elementos en a) serie y b) paralelo.

$$Z_s = \frac{-\omega^2 LC + j\omega RC + 1}{j\omega C} \quad (1)$$

$$Z_p = \frac{j\omega L}{-\omega^2 LC + j\omega \frac{L}{R} + 1} \quad (2)$$

Ejemplo de aplicación

Trabajo Práctico 3, Ejercicio 6

Dados los siguientes tres elementos (concentrados):

$$R = 300 \, \Omega, \, L = 2.2 \, \mu\text{Hy}, \, C = 3 \, \text{pF}$$

representar en el ábaco la impedancia vista en terminales (suponiendo que se conectan a una línea de $Z_0 = 50 \, \Omega$) tomando 5 puntos entre 50 y 700 MHz, conectando dichos elementos en a) serie y b) paralelo.

$$Z_s = \frac{-\omega^2 LC + j\omega RC + 1}{j\omega C} \quad (1)$$

$$Z_p = \frac{j\omega L}{-\omega^2 LC + j\omega \frac{L}{R} + 1} \quad (2)$$

Solución tradicional

Se realiza una tabla con determinadas frecuencias y se calcula el valor de las impedancias serie Z_s y paralelo Z_p .

$f[\text{MHz}]$	Z_s	Z_p
100	$300 + j852$	$267 - j93$
200	$300 + j2500$	$146 - j149$
300	$300 + j3970$	$82 - j134$
400	$300 + j5397$	$51 - j112$
500	$300 + j6805$	$34 - j95$

Solución tradicional

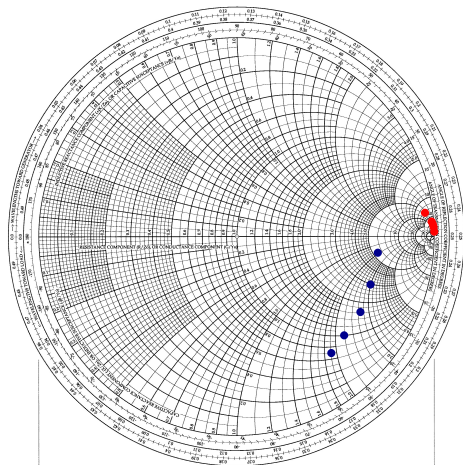
Se normalizan las impedancias considerando la Z_0 y se grafican en el ábaco.

$f[\text{MHz}]$	z_s	z_p
100	$6 + j17$	$5.3 - j1.9$
200	$6 + j50$	$2.9 - j3$
300	$6 + j79$	$1.6 - j2.7$
400	$6 + j108$	$1 - j2.2$
500	$6 + j136$	$0.7 - j1.9$

Solución tradicional

Se normalizan las impedancias considerando la Z_0 y se grafican en el ábaco.

f [MHz]	z_s	z_p
100	$6 + j17$	$5.3 - j1.9$
200	$6 + j50$	$2.9 - j3$
300	$6 + j79$	$1.6 - j2.7$
400	$6 + j108$	$1 - j2.2$
500	$6 + j136$	$0.7 - j1.9$

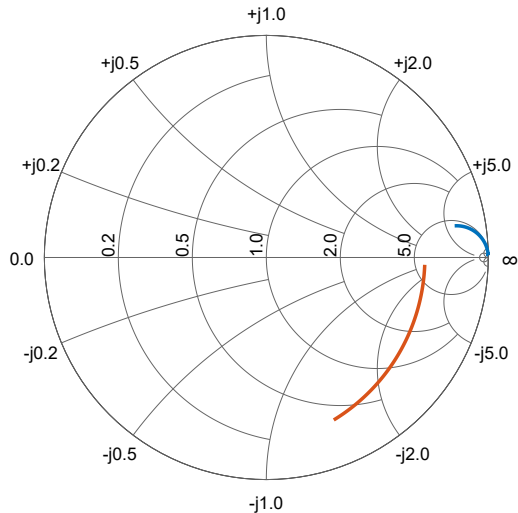


Solución utilizando MATLAB

```
1 R = 300; L = 2.2e-6;  
2 C = 3e-12; Z0 = 50;  
3 f = 75e6:1e6:700e6;  
4 XL = 1i*2*pi.*f*L;  
5 XC = -1i./(2*pi.*f*C);  
6 % Cálculo de impedancias  
7 Zs = R + XL + XC;  
8 Zp = 1./(1/R + 1./XL + 1./XC);  
9 % Conversión y gráficos  
10 G1 = z2gamma (Zs,Z0);  
11 G2 = z2gamma (Zp,Z0);  
12 h1 = smithchart(G1); hold on  
13 h2 = smithchart(G2);
```

Solución utilizando MATLAB

```
1 R = 300; L = 2.2e-6;  
2 C = 3e-12; Z0 = 50;  
3 f = 75e6:1e6:700e6;  
4 XL = 1i*2*pi.*f*L;  
5 XC = -1i./(2*pi.*f*C);  
6 % Cálculo de impedancias  
7 Zs = R + XL + XC;  
8 Zp = 1./(1/R + 1./XL + 1./XC);  
9 % Conversión y gráficos  
10 G1 = z2gamma (Zs,Z0);  
11 G2 = z2gamma (Zp,Z0);  
12 h1 = smithchart(G1); hold on  
13 h2 = smithchart(G2);
```



Solución utilizando MATLAB

- La función `G = z2gamma(z,z0)` convierte la impedancia z en el coeficiente de reflexión G , utilizando la impedancia de referencia z_0 de acuerdo a la ecuación:

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (3)$$

- La función `hsm = smithchart(G)` grafica el vector complejo del coeficiente de reflexión G en el ábaco de Smith. En `hsm` se guarda el *handle* que permite cambiar las propiedades de la figura, como el color y ancho del trazo, definir marcadores, etc.

Adaptación de impedancias: esquema general

En los sistemas de RF la condición de diseño ideal se obtiene cuando:

- La carga está adaptada a la línea de transmisión para evitar pérdidas en la onda reflejada y tensiones elevadas por ondas estacionarias (bajar el ROE).
- Cuando el generador está adaptado a la línea de transmisión para transferir la máxima potencia.
- Para lograr el objetivo se intercalan redes adaptadoras sin pérdidas en ambos extremos de la línea.

Adaptación de impedancias: esquema general

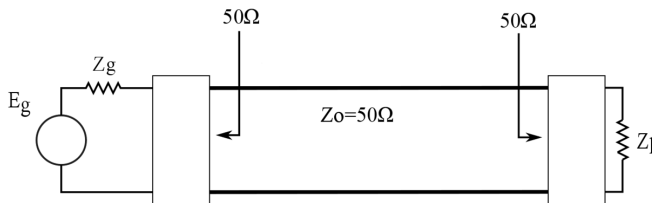
En los sistemas de RF la condición de diseño ideal se obtiene cuando:

- La carga está adaptada a la línea de transmisión para evitar pérdidas en la onda reflejada y tensiones elevadas por ondas estacionarias (bajar el ROE).
- Cuando el generador está adaptado a la línea de transmisión para transferir la máxima potencia.
- Para lograr el objetivo se intercalan redes adaptadoras sin pérdidas en ambos extremos de la línea.

Adaptación de impedancias: esquema general

En los sistemas de RF la condición de diseño ideal se obtiene cuando:

- La carga está adaptada a la línea de transmisión para evitar pérdidas en la onda reflejada y tensiones elevadas por ondas estacionarias (bajar el ROE).
- Cuando el generador está adaptado a la línea de transmisión para transferir la máxima potencia.
- Para lograr el objetivo se intercalan redes adaptadoras sin pérdidas en ambos extremos de la línea.



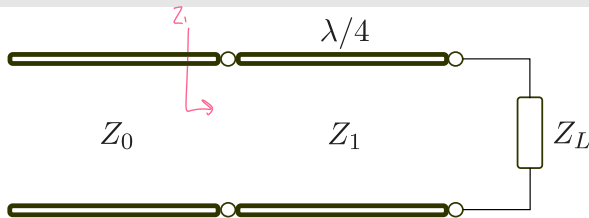
Sección 2

Adaptación de impedancias: transformador de $\lambda/4$

Adaptación: transformador de $\lambda/4$

Trabajo Práctico 5, Ejercicio 6

Diseñar un transformador de $\lambda/4$ para adaptar una antena de $75\ \Omega$ a una línea sin pérdidas de $Z_0 = 50\ \Omega$. Determinar el ancho de banda para que el ROE no sea mayor a 1.3, siendo $f_0 = 60\ \text{MHz}$.



Adaptación: transformador de $\lambda/4$

La impedancia de entrada Z_{in} desde el punto de conexión entre las líneas Z_0 y Z_1 se puede encontrar con

$$Z_{in} = Z_1 \frac{Z_L + jZ_1 \tan \beta l}{Z_1 + jZ_L \tan \beta l} \quad (4)$$

Evalutando βl en la frecuencia de diseño, $\beta l = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{4} = \frac{\pi}{2}$, e igualando a Z_0 resulta en

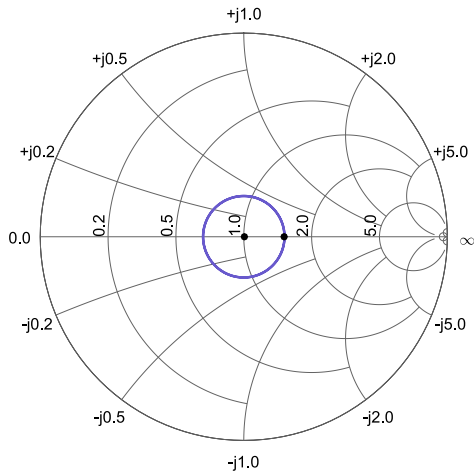
$$Z_1 = \sqrt{Z_0 Z_L} \quad (5)$$

Reescribiendo βl como $\beta l = \frac{2\pi f \lambda_0}{v_p} \frac{1}{4} = \frac{\pi f}{2f_0}$ y utilizando la ecuación (4) se puede evaluar la respuesta en frecuencia del transformador.

Adaptación: transformador de $\lambda/4$

**Impedancia de entrada sin adaptar
(sección Z_0 y carga Z_L)**

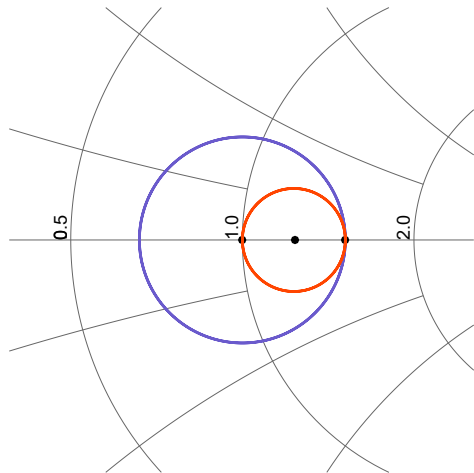
```
1 f = 60e6;  
2 Z0 = 50;  
3 ZL = 75;  
4 Z1 = sqrt(Z0*ZL);  
5 f_f0 = 0:1e-3:4;  
6 theta = pi/2*f_f0;  
7 % Impedancia Zin sin adaptar  
8 Zin_0 = Z0*(ZL+1i*Z0*tan(theta)) ...  
    ./(Z0+1i*ZL*tan(theta));  
9 GZin_0 = z2gamma(Zin_0);  
10 h1 = smithchart(GZin_0);
```



Adaptación: transformador de $\lambda/4$

**Impedancia de entrada sin adaptar
(sección $Z_1 = 61.2\Omega$ y carga Z_L)**

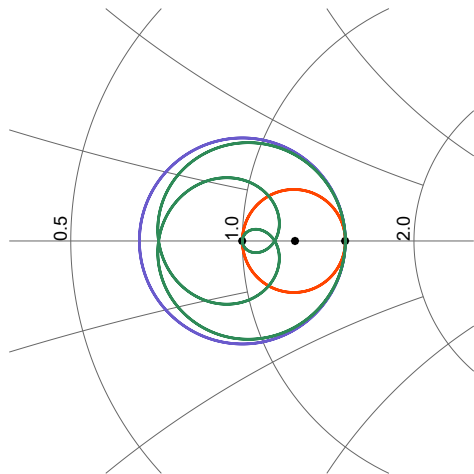
```
1 Zin_1 = Z1*(ZL+1i*Z1*tan(theta)) ...  
  ./ (Z1+1i*ZL*tan(theta));  
2 GZin_1 = z2gamma(Zin_1);  
3 h2      = smithchart(GZin_1);
```



Adaptación: transformador de $\lambda/4$

**Impedancia de entrada adaptada
(secciones Z_0 , Z_1 y carga Z_L)**

```
1 Zin_2 = ...  
    Z0*(Zin_1+1i*Z0*tan(theta)) ...  
    ./ (Z0+1i*Zin_1.*tan(theta));  
2 GZin_2 = z2gamma(Zin_2);  
3 h3      = smithchart(GZin_2);
```



Adaptación: transformador de $\lambda/4$

Se pide determinar el ancho de banda para $ROE < 1.3$. La Relación de Onda Estacionaria (ROE) se define como

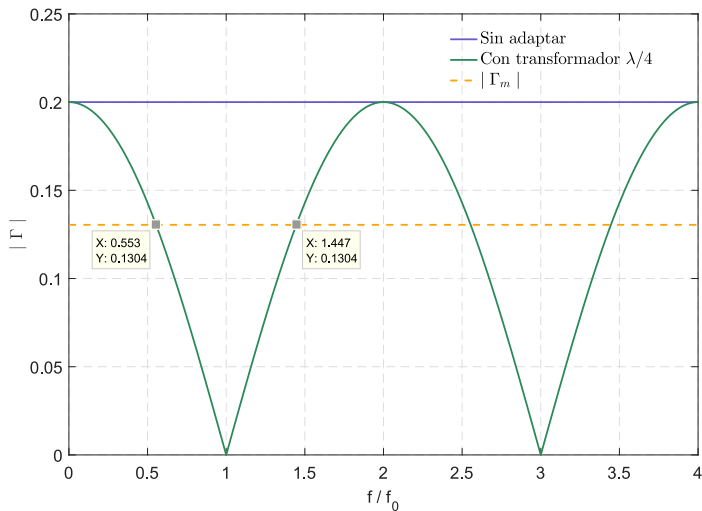
$$ROE = \frac{1 + |\Gamma_m|}{1 - |\Gamma_m|} \quad (6)$$

A partir de (6) se puede despejar el módulo del máximo coeficiente de reflexión permitido $|\Gamma_m|$:

$$|\Gamma_m| = \frac{ROE - 1}{ROE + 1} \quad (7)$$

El ancho de banda se puede encontrar de forma gráfica, encontrando la intersección entre el coeficiente de reflexión de Z_{in} y el valor máximo $|\Gamma_m|$.

Adaptación: transformador de $\lambda/4$



Adaptación: transformador de $\lambda/4$

De forma analítica, la frecuencia límite inferior del ancho de banda se puede obtener con

$$f_m = \frac{2\theta_m f_0}{\pi} \quad (8)$$

donde $\theta = \beta l$, y

$$\theta_m = \arccos \left(\frac{\Gamma_m}{\sqrt{1 - \Gamma_m^2}} \frac{2\sqrt{Z_0 Z_L}}{|Z_L - Z_0|} \right) \quad (9)$$

Para el ejercicio planteado:

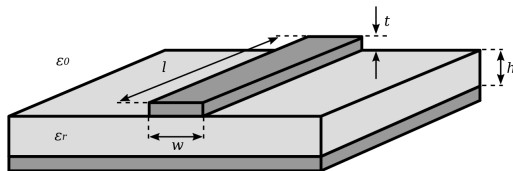
$$\theta_m = 0.87, f_m = 0.554f_0 = 33.24 \text{ MHz}, \Delta f = 2(f_0 - f_m) = 53.5 \text{ MHz}.$$

Adaptación: transformador de $\lambda/4$

Tarea 1

- Diseñe un transformador de $\lambda/4$ para adaptar una carga $Z_L = 300 \Omega$ a una línea de $Z_0 = 50 \Omega$, y grafique el módulo del coeficiente de reflexión en dB en función de la frecuencia. Encuentre el AB para el cual el mismo se mantiene por debajo de -10 dB.
- Diseñe un transformador de $\lambda/4$ para una impedancia de carga de 100Ω , determine el AB en este segundo diseño y compare los resultados con los de la carga de 300Ω .

Implementación de un transformador de $\lambda/4$ en microstrip



Para implementar una línea microstrip en MATLAB se utiliza la siguiente sintaxis:

```
1 tx = rfckt.microstrip('Width',W,'Height',h,'Thickness',t,  
2 'EpsilonR',er,'LossTangent',tanD,'LineLength',l,'SigmaCond',sigma);
```

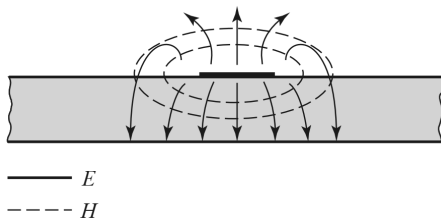
Implementación de un transformador de $\lambda/4$ en microstrip

Los parámetros del sustrato FR4 que se usará para implementar la línea microstrip son:

- Altura del sustrato, $h = 1.5$ mm.
- Espesor del cobre, $t = 35$ μm .
- Constante dieléctrica efectiva, $\epsilon_e \approx 3.2$
- Tangente del ángulo de pérdidas, $\delta = 0.01$.
- Conductividad del cobre, $\sigma = 5.85 * 10^7$ S/m.

Implementación de un transformador de $\lambda/4$ en microstrip

La constante dieléctrica efectiva ϵ_e de la línea microstrip es un valor que se encuentra entre $1 < \epsilon_e < \epsilon_r$, debido a que algunas líneas de campo se encuentran en el aire y otras en el dieléctrico.



$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{W}}} \quad (10)$$

Implementación de un transformador de $\lambda/4$ en microstrip

Si se desea sintetizar un tramo de línea con impedancia Z_0 , se deben resolver las siguientes ecuaciones:

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (11)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (12)$$

$$\frac{W}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & \text{para } W/h < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\} & \text{para } W/h > 2 \end{cases} \quad (13)$$

Implementación de un transformador de $\lambda/4$ en microstrip

Ejemplo

Se requiere adaptar una carga $Z_L = 100 \, \Omega$ con un transformador $\lambda/4$ a una línea de impedancia característica $Z_0 = 50 \, \Omega$, para operar en una frecuencia $f_0 = 1 \, \text{GHz}$.

$$Z_1 = \sqrt{Z_0 Z_L} = 70.7 \, \Omega$$

- Luego de calcular el ancho de los segmentos microstrip para Z_0 y Z_1 , se generan los objetos `rfckt.microstrip` con los parámetros dados.
- El método `getz0` permite verificar la impedancia característica de cada línea de transmisión.

Implementación de un transformador de $\lambda/4$ en microstrip

- Para modelar la carga Z_L , se crea un objeto de la clase `rfckt.seriesrlc`.
- Es necesario aplicar el método `analyze` a cada objeto circuital creado, y de esta forma obtener sus parámetros S. Por definición, cuando se mide el parámetro S_{11} el puerto 2 se debe terminar en la impedancia característica. Entonces, cuando se define la carga Z_L se hace con la siguiente expresión:

```
1 Zload = rfckt.seriesrlc('R',ZL-Z0);
```

Y se generan los parámetros S con:

```
1 f = 0.5e9:1e6:1.5e9;  
2 analyze(Zload,f);
```

Implementación de un transformador de $\lambda/4$ en microstrip

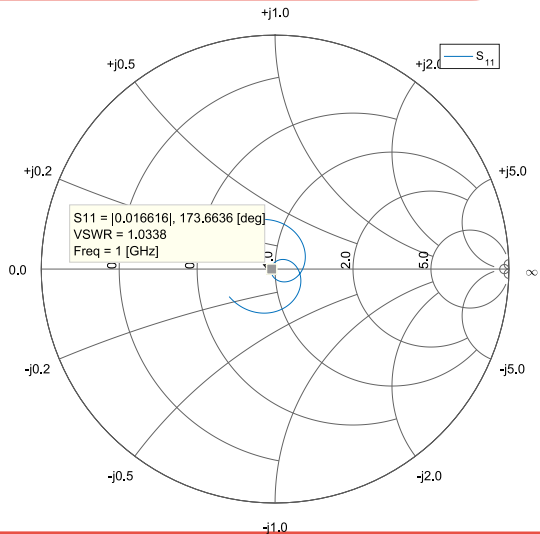
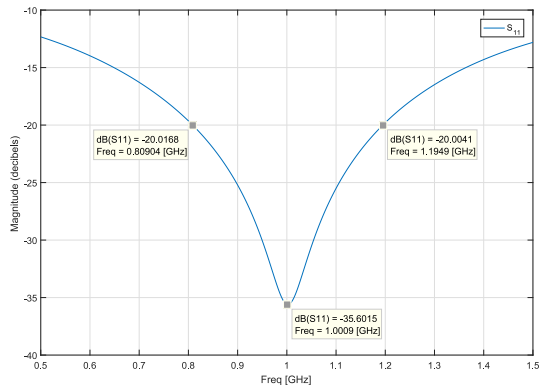
Luego es necesario combinar todos los elementos (en orden, desde el generador a la carga) generando un objeto del tipo `rfckt.cascade` y analizar el conjunto:

```
1 trafo = rfckt.cascade('Ckts',{tx0,tx1,Zload});  
2 analyze(trrafo,f);
```

Por último, se puede graficar el parámetro S_{11} en el ábaco de Smith o su módulo en función de la frecuencia. El método `listformat` brinda una lista de los formatos válidos para cada parámetro.

```
1 % listformat(trrafo,'S11')  
2 plot(trrafo,'S11','dB');  
3 smith(trrafo,'S11','dB');
```

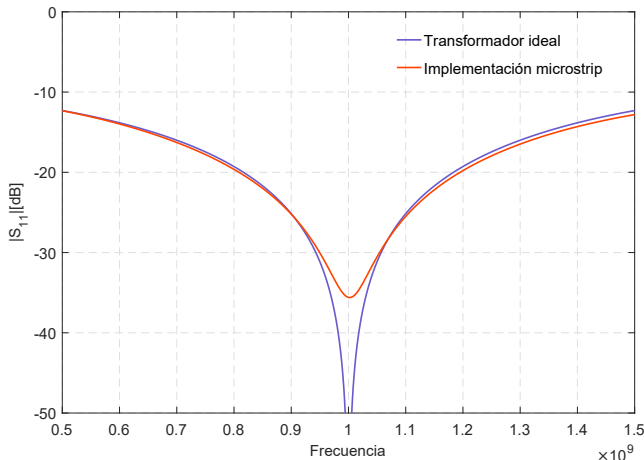

Implementación de un transformador de $\lambda/4$ en microstrip



Implementación de un transformador de $\lambda/4$ en microstrip

También se puede realizar la adaptación ideal como en la Sección 2 y comparar ambas curvas. Los datos del objeto pueden extraerse y manipularse con otros datos mediante

```
1 [S_Par, f] = extract ...  
    (trafo, 'S_Parameters');
```



Sección 3

Adaptación de impedancias: elementos concentrados

Adaptación: elementos concentrados

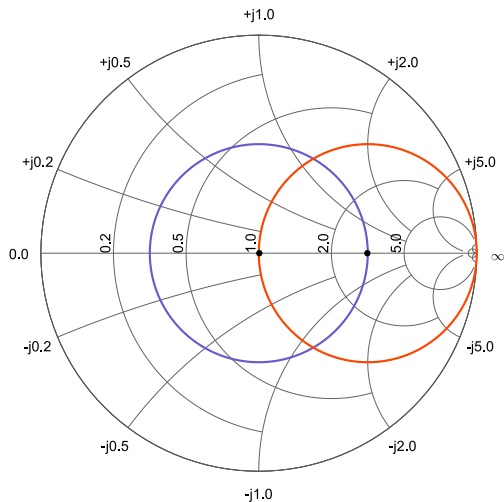
Trabajo Práctico 5, Ejercicio 1

Sea una L.T. sin pérdidas, $Z_0 = 50 \, \Omega$, $Z_R = 150 \, \Omega$, gobernada por una fuente de frecuencia constante, utilizando:

- Un condensador.
- Una bobina.
- Un stub en corto circuito.
- Un stub en circuito abierto.

Adaptación: elementos en serie

```
1 Z0 = 50;  
2 ZL = 150;  
3 GZL = z2gamma(ZL,Z0);  
4 % Genero un objeto donde graficar  
5 adapt = rfckt.passive;  
6 % Frecuencia de diseño  
7 f0 = 100e6;  
8 figure  
9 [h1,hsm] = circle (adapt,f0, ...  
    'Gamma',abs(GZL),'R',1);  
10 hold on
```



Adaptación: elementos en serie

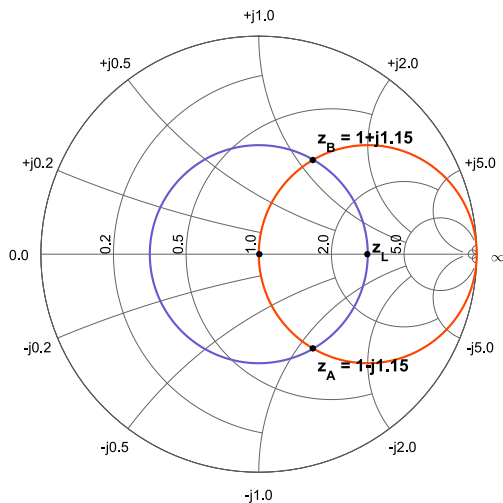
Utilizando la función `imped_match_find_circle_intersections_helper` se puede encontrar los puntos de intersección entre dos círculos, ingresando las coordenadas del centro de cada círculo y sus radios.

```
1 [ptA,ptB] = imped_match_find_circle_intersections_helper([0 0], ...  
2     abs(GZL),[0.5 0],0.5);  
3 ptA_mag = sqrt(ptA(1)^2 + ptA(2)^2);  
4 ptA_ang = atan2(ptA(2),ptA(1));  
5 ptB_mag = sqrt(ptB(1)^2 + ptB(2)^2);  
6 ptB_ang = atan2(ptB(2),ptB(1));  
7  
8 GZA = ptA_mag*exp(1j*ptA_ang);  
9 ZA = gamma2z (GZA,Z0);  
10 GZB = ptB_mag*exp(1j*ptB_ang);  
11 ZB = gamma2z (GZB,Z0);
```

Adaptación: elementos en serie

Los puntos encontrados pueden destacarse mediante marcadores y anotaciones dentro del ábaco.

```
1 % Marcador ZA
2 plot(ptA(1),ptA(2), ...
    'k.', 'MarkerSize', 16);
3 % Marcador ZB
4 plot(ptB(1),ptB(2), ...
    'k.', 'MarkerSize', 16);
5 % Anotacion ZL
6 text (real(GZL) +.02, imag(GZL) ...
    +.02, 'z_L', 'FontSize', 12, ...
    'FontWeight', 'Bold');
```



Adaptación con C en serie

Elijo el punto z_B , ya que la reactancia agregada por el capacitor en serie es negativa.

$$X_C = \text{Im}(Z_B) \quad (14)$$

$$C_s = \frac{1}{2\pi f_0 X_C} = 27.6 \text{ pF} \quad (15)$$

Para alcanzar ese punto, se debe agregar una línea con impedancia Z_0 que produzca un cambio de fase $\theta_{LB} = \theta_{ZL} - \theta_{ZB} = 5.236 \text{ rad}$.

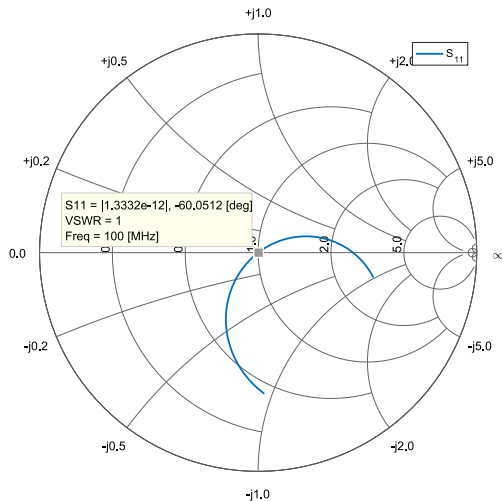
En longitudes de onda,

$$\lambda_{LB} = \frac{\theta_{LB}}{4\pi} \lambda = 0.417 \lambda \quad (16)$$

Implementación con C en serie

Se generan los objetos necesarios: la carga, una línea de transmisión genérica `rfckt.txline` y el capacitor serie.

```
1 f = 0.8*f0:1e6:1.2*f0;
2 Zload = rfckt.seriesrlc('R',ZL-Z0);
3 tx1 = rfckt.txline('Z0',Z0, ...
    'LineLength',lB_metros,'PV',vp)
4 Cs = rfckt.seriesrlc('C',C);
5 analyze(Zload,f);
6 analyze(tx1,f);
7 analyze(Cs,f);
8 AdaptCs = rfckt.cascade('Ckts', ...
    {Cs,tx1,Zload});
9 analyze(AdaptCs,f);
```



Adaptación con L en serie

En este caso elijo el punto z_A , ya que la reactancia agregada por el inductor en serie es positiva.

$$X_L = \text{Im}(Z_A) \quad (17)$$

$$L_s = \frac{X_L}{2\pi f_0} = 91.9 \text{ nH} \quad (18)$$

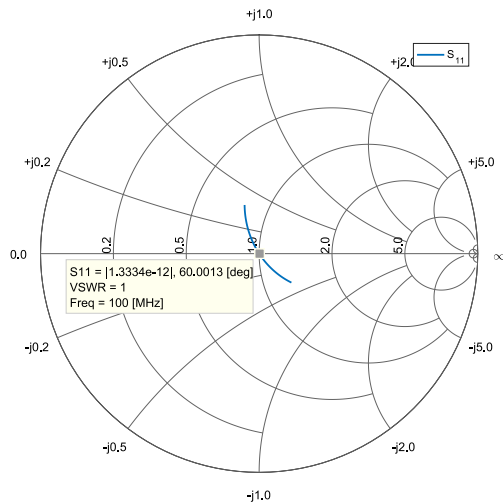
Para alcanzar ese punto, se debe agregar una línea con impedancia Z_0 que produzca un cambio de fase $\theta_{LA} = \theta_{ZL} - \theta_{ZA} = 1.047 \text{ rad}$.

En longitudes de onda,

$$\lambda_{LA} = \frac{\theta_{LA}}{4\pi} \lambda = 0.083 \lambda \quad (19)$$

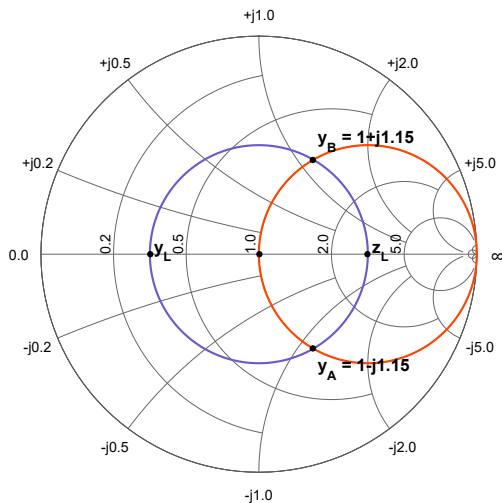
Implementación con L en serie

```
1 tx2 = rfckt.txline ('Z0',Z0, ...  
    'LineLength',lA_metros,'PV',vp)  
2 Ls = rfckt.seriesrlc('L',L);  
3 analyze(tx2,f);  
4 analyze(Ls,f);  
5 AdaptLs = rfckt.cascade('Ckts', ...  
    {Ls,tx2,Zload});  
6 analyze(AdaptLs,f);
```



Adaptación: elementos en paralelo

Al trabajar con elementos en paralelo utilizaremos la carta de Smith como carta de admitancias, transformando la impedancia z_L en la admitancia y_L . Siguiendo el mismo procedimiento, se grafican el círculo de $|\Gamma_L|$ constante y el de resistencia $R = 1$. Las intersecciones serán las mismas, pero en este caso admitancias (y_A e y_B).



Adaptación con C en paralelo / L en paralelo

CAP: Elijo el punto y_A , ya que la susceptancia agregada por el capacitor en paralelo es positiva. Desnormalizo para obtener Y_A .

IND: Sucede lo contrario, elijo el punto y_B y desnormalizo.

$$B_C = \text{Im}(Y_A)$$

$$C_p = \frac{B_C}{2\pi f_0} = 36.7 \text{ pF}$$

$$B_L = \text{Im}(Y_B)$$

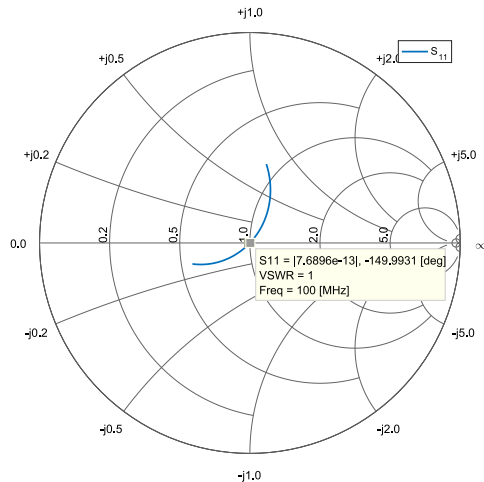
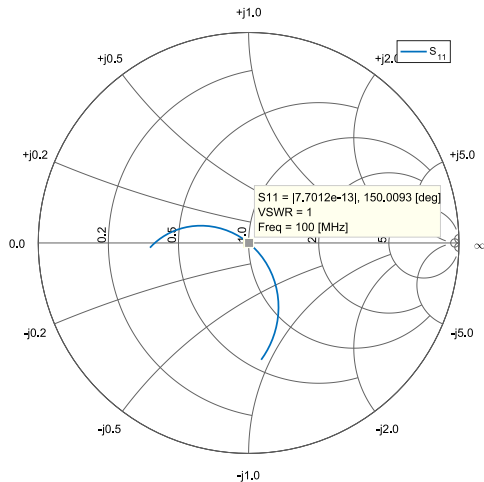
$$L_p = \frac{1}{2\pi f_0 B_L} = 68.9 \text{ nH}$$

El cambio de fase en longitudes de onda es el mismo que en el caso de adaptación serie, con una diferencia de $\lambda/4$, porque se utilizó la y_L .

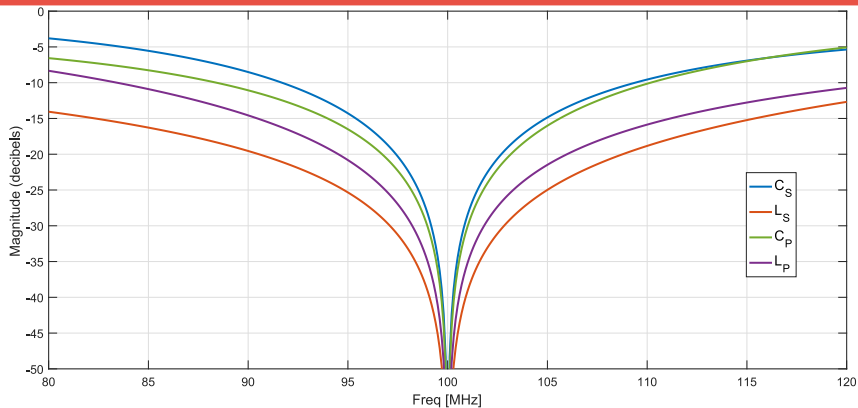
$$\lambda_{LA} = 0.333 \lambda$$

$$\lambda_{LB} = 0.167 \lambda$$

Implementación con C en paralelo / L en paralelo



Comparativa



C_s	L_s	C_p	L_p	λ_{C_s}	λ_{L_s}	λ_{C_p}	λ_{L_p}
27.6 pF	91.9 nH	36.7 pF	68.9 nH	0.417λ	0.083λ	0.333λ	0.167λ

Sección 4

Adaptación de impedancias: stub simple y doble

Adaptación: stub simple en paralelo

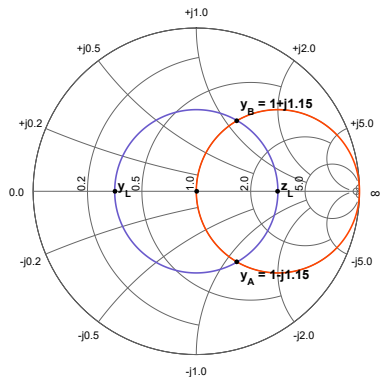
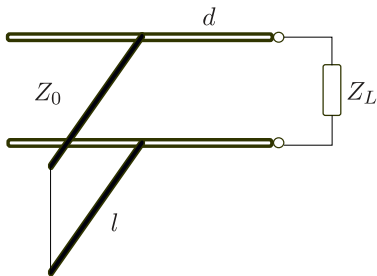
Trabajo Práctico 5, Ejercicio 1

Sea una L.T. sin pérdidas, $Z_0 = 50 \, \Omega$, $Z_R = 150 \, \Omega$, gobernada por una fuente de frecuencia constante, utilizando:

- Un condensador.
- Una bobina.
- Un stub en corto circuito.
- Un stub en circuito abierto.

Adaptación: stub simple en paralelo

Al trabajar con stub en paralelo se utilizará la carta de admitancias nuevamente. Las admitancias y_A e y_B en las intersecciones de los círculos son las mismas que para los elementos concentrados en paralelo, la distancia d a la carga en cada caso son $\lambda_A = 0.333 \lambda$ y $\lambda_B = 0.167 \lambda$, respectivamente.



Adaptación: stub simple en paralelo

La longitud del stub se elige para anular la parte imaginaria de la solución elegida.

- 1 Primera solución (y_A): La admitancia del stub $y_{SA} = -\text{Im}(y_A) = j1.15$.
- 2 Segunda solución (y_B): La admitancia del stub $y_{SB} = -\text{Im}(y_B) = -j1.15$.

La susceptancia obtenida se puede graficar con:

```
1 ySA      = 1-yA;  
2 [h2,hsm] = circle(adapt,f0,'X',imag(ySA));
```

De acuerdo a la terminación del stub, en circuito abierto o cortocircuito, existen dos alternativas de stub para cada solución.

Adaptación: stub simple, 1º solución, CC

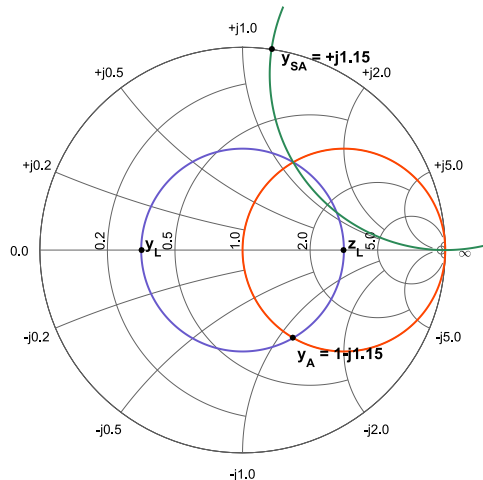
Longitud del stub

- Para el stub en cortocircuito, el cambio de fase

$$\theta_{SA-CC} = \theta_{CC} - \theta_{SA} = 4.856 \text{ rad.}$$

Tener en cuenta que al ser la carta de admitancias, el cortocircuito se encuentra en $y = \infty$

$$\lambda_{SA-CC} = 0.386 \lambda$$



Adaptación: stub simple, 1º solución, CC

Longitud del stub

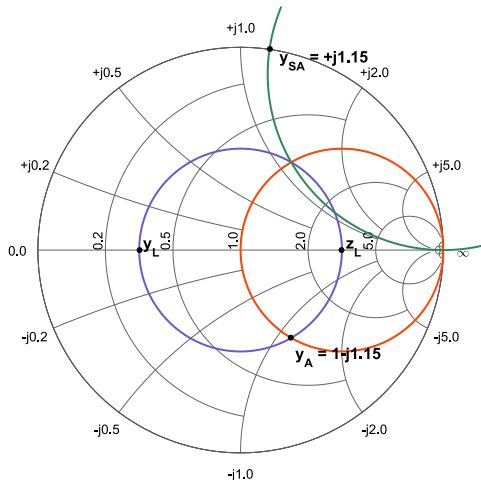
- Para el stub en cortocircuito, el cambio de fase

$$\theta_{SA-CC} = \theta_{CC} - \theta_{SA} = 4.856 \text{ rad.}$$

Tener en cuenta que al ser la carta de admitancias, el cortocircuito se encuentra en $y = \infty$

- En longitudes de onda:

$$\lambda_{SA-CC} = 0.386 \lambda$$



Adaptación: stub simple, 1° solución, CA

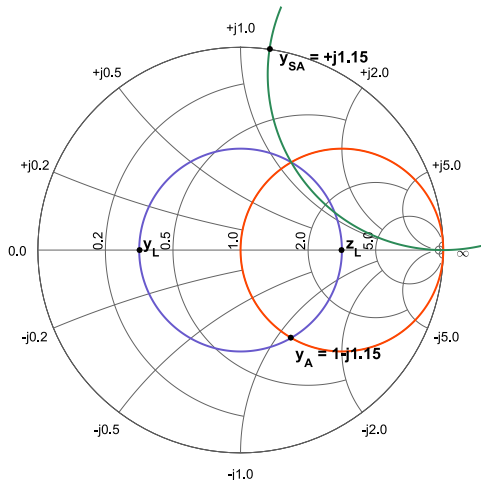
Longitud del stub

- Para el stub en circuito abierto, el cambio de fase

$$\theta_{SA-CA} = \theta_{CA} - \theta_{SA} = 1.714 \text{ rad.}$$

Circuito abierto en $y = 0$

- En longitudes de onda:
 $\lambda_{SA-CA} = 0.136 \lambda$



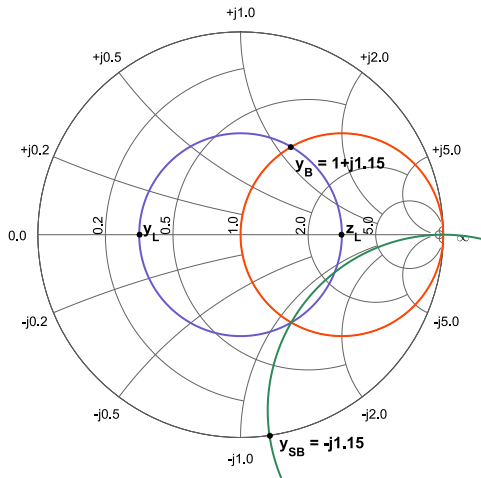
Adaptación: stub simple, 2° solución

Longitud del stub

Para la segunda solución se procede de manera similar: se encuentra la admitancia y_{SB} que debe tener el stub, y se calcula su largo de acuerdo a la terminación del mismo (circuito abierto o cortocircuito).

$$\lambda_{SB-CC} = 0.114 \lambda$$

$$\lambda_{SB-CA} = 0.364 \lambda$$

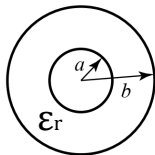


Adaptación: stub simple

Tarea 2

Adapte una carga de $Z_L = 100 + j75 \Omega$ a una línea de transmisión de 300Ω utilizando la técnica del stub simple en paralelo. Utilice como criterio de diseño que la distancia de la carga al stub sea la mínima posible y que la longitud del stub también sea la mínima posible.

Implementación de stubs con líneas coaxiales



Para implementar una línea coaxial en MATLAB se utiliza la siguiente sintaxis:

```
1 tx0 = rfckt.coaxial ('OuterRadius',b,'InnerRadius',a, ...  
    'EpsilonR',er,'LineLength',l,'LossTangent',tanD);
```

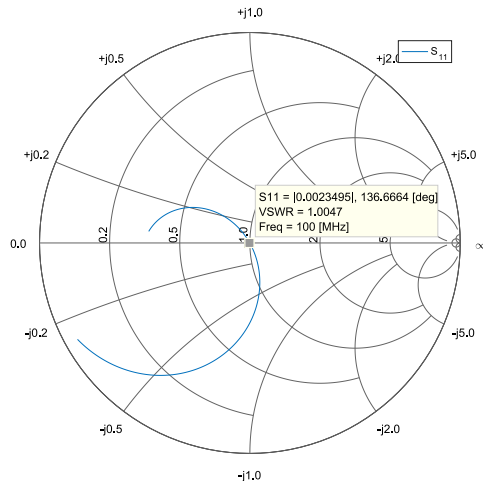
Para los stubs, se debe agregar la propiedad correspondiente:

```
1 tx_s1 = rfckt.coaxial ('OuterRadius',b,'InnerRadius',a,'EpsilonR',er, ...  
    'LineLength',l, 'LossTangent',tanD,'StubMode','Shunt', ...  
    'Termination','Short');
```

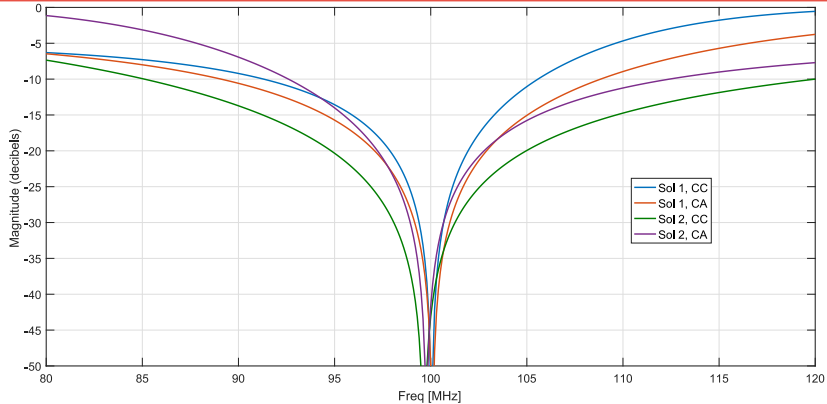
Implementación de stubs con líneas coaxiales

Luego de generar los segmentos de coaxial en base a las dimensiones de algún cable comercial de $50\ \Omega$ (por ejemplo, RG-58), se genera el objeto `rfckt.cascade` y se analiza el conjunto:

```
1 stub1CC = rfckt.cascade('Ckts', ...  
    {tx_s1,tx0,Zload});  
2 analyze(stub1CC,f);  
3 smith(stub1CC,'S11');
```



Comparativa

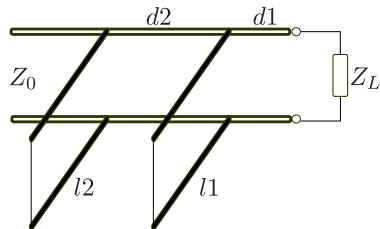


λ_A	λ_{SA-CC}	λ_{SA-CA}	λ_B	λ_{SB-CC}	λ_{SB-CA}
0.333λ	0.386λ	0.136λ	0.167λ	0.114λ	0.364λ

Adaptación: stub doble en paralelo

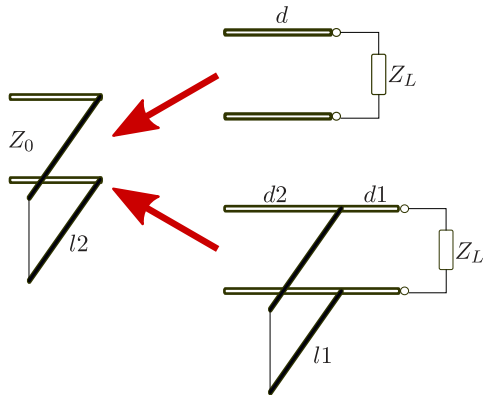
En la adaptación con 2 stubs, las distancias $d1$ y $d2$ generalmente están fijas y las variables de diseño son las longitudes de los stubs, $l1$ y $l2$.

De esta forma, si la carga varía, se pueden encontrar nuevas dimensiones para los stubs y mantener la adaptación.



Adaptación: stub doble en paralelo

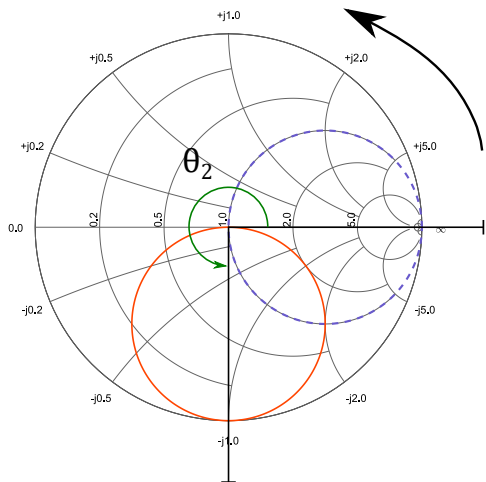
En la posición donde se aplica el segundo stub, se puede analizar como una adaptación con stub simple: la admitancia de entrada es $y_3 = 1 \pm jB_3$, y la longitud del stub l_2 se elige para anular la susceptancia de y_3 , que se encuentra sobre el círculo de conductancia $G = 1$.



Adaptación: stub doble en paralelo

La distancia d_2 que existe hasta el primer stub se comporta como una rotación de este círculo dentro del ábaco, en un ángulo θ_2 con sentido hacia la carga.

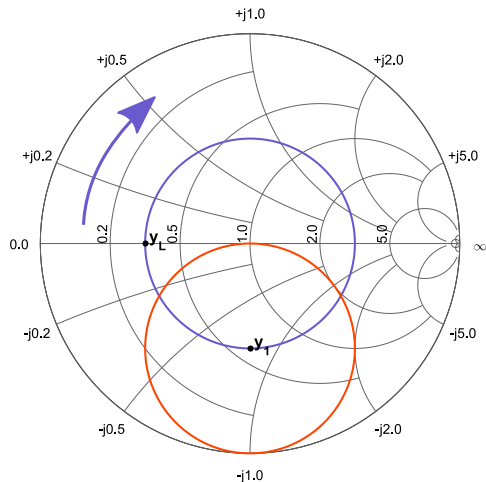
En la figura, el **círculo auxiliar** para una distancia entre stubs de $3/8 \lambda$. La admitancia de entrada y_2 en este punto, con el primer stub colocado, se debe encontrar sobre el círculo auxiliar.



Adaptación: stub doble en paralelo

Ejercicio 3, TP 5 ($Z_L = 150 \Omega$, $d_1 = 3/8 \lambda$)

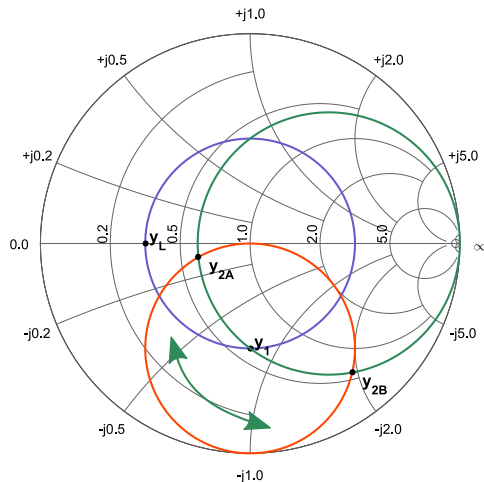
- La admitancia de carga normalizada $y_L = 0.33$ se mueve por el círculo de $|\Gamma_L| = 0.5$ hasta $y_1 = 0.6 - j0.8$, en una cantidad λ_1 dada por la distancia d_1 .
- Agregando el primer stub, se lleva la admitancia y_1 hasta y_2 , por el círculo de conductancia constante $G = \text{Re}(y_1)$ hasta alcanzar el círculo auxiliar. Existen dos soluciones:
 - 1 $y_{2A} = 0.6 - j0.083$,
 - 2 $y_{2B} = 0.6 - j1.916$.



Adaptación: stub doble en paralelo

Ejercicio 3, TP 5 ($Z_L = 150 \Omega$, $d_1 = 3/8 \lambda$)

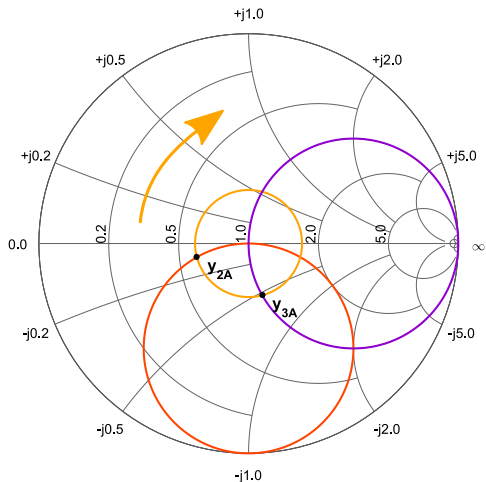
- La admitancia de carga normalizada $y_L = 0.33$ se mueve por el círculo de $|\Gamma_L| = 0.5$ hasta $y_1 = 0.6 - j0.8$, en una cantidad λ_1 dada por la distancia d_1 .
- Agregando el primer stub, se lleva la admitancia y_1 hasta y_2 , por el círculo de conductancia constante $G = \text{Re}(y_1)$ hasta alcanzar el círculo auxiliar. Existen dos soluciones:
 - 1 $y_{2A} = 0.6 - j0.083$,
 - 2 $y_{2B} = 0.6 - j1.916$.



Adaptación: stub doble, 1º solución

Ejercicio 3, TP 5 ($Z_L = 150 \Omega$, $d_1 = 3/8 \lambda$)

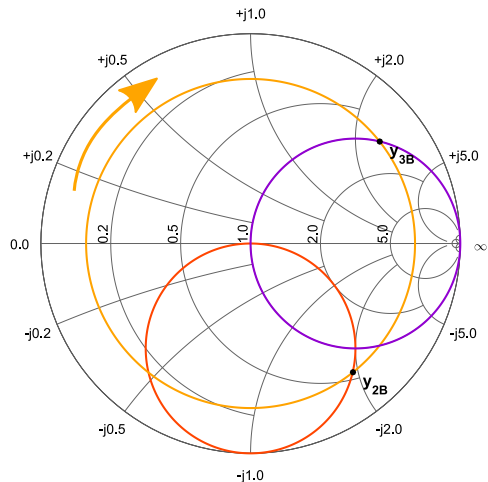
- Realizando el desplazamiento λ_2 dado por la distancia d_2 , la admitancia y_{2A} se mueve por el círculo de $|\Gamma_{2A}| = 0.26$ hasta $y_{3A} = 1 - j0.527$.
- Dado que el círculo auxiliar es el círculo de $R = 1$ rotado λ_2 hacia la carga, cuando nos movemos desde la carga al generador la admitancia y_{3A} cae sobre el círculo unitario.



Adaptación: stub doble, 2° solución

Ejercicio 3, TP 5 ($Z_L = 150 \Omega$, $d_1 = 3/8 \lambda$)

- Si la solución elegida hubiera sido la segunda, al realizar la rotación de λ_2 la admitancia y_{2B} se movería por el círculo de $|\Gamma_{2B}| = 0.78$ hasta $y_{3B} = 1 + j2.527$.



Adaptación: stub doble, 1° solución

Longitudes de los stubs

- 1 Para la primera solución, el stub 1 debe aportar:

$$y_{s11} = y_{2A} - y_1 = j0.717$$

$$\lambda_{s11} = 0.349\lambda$$

- 2 El stub 2, en tanto, agrega una susceptancia de:

$$y_{s12} = -\text{Im}(y_{3A}) = j0.527$$

$$\lambda_{s12} = 0.327\lambda$$

Adaptación: stub doble, 1° solución

Longitudes de los stubs

- 1 Para la primera solución, el stub 1 debe aportar:

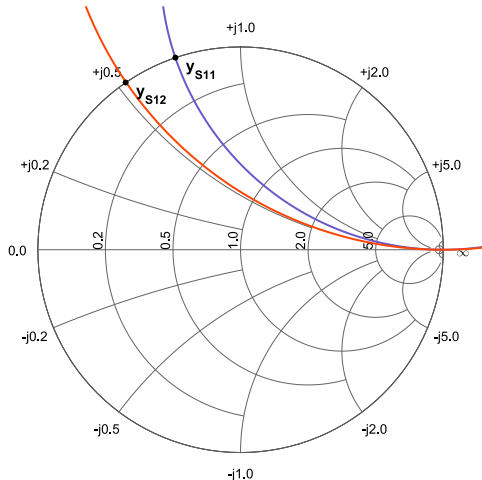
$$y_{s11} = y_{2A} - y_1 = j0.717$$

$$\lambda_{s11} = 0.349\lambda$$

- 2 El stub 2, en tanto, agrega una susceptancia de:

$$y_{s12} = -\text{Im}(y_{3A}) = j0.527$$

$$\lambda_{s12} = 0.327\lambda$$



Adaptación: stub doble, 2° solución

Longitudes de los stubs

- 1 Para la segunda solución, el stub 1 aportará:

$$y_{s21} = y_{2B} - y_1 = -j1.116$$

$$\lambda_{s21} = 0.116\lambda$$

- 2 El stub 2, en tanto, agrega una susceptancia de:

$$y_{s22} = -\text{Im}(y_{3B}) = j2.527$$

$$\lambda_{s22} = 0.06\lambda$$

Adaptación: stub doble, 2° solución

Longitudes de los stubs

- 1 Para la segunda solución, el stub 1 aportará:

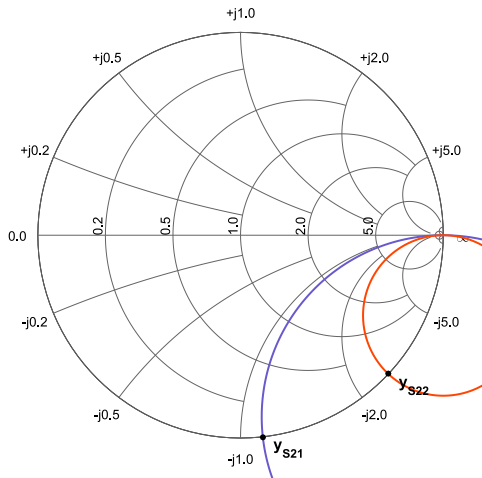
$$y_{s21} = y_{2B} - y_1 = -j1.116$$

$$\lambda_{s21} = 0.116\lambda$$

- 2 El stub 2, en tanto, agrega una susceptancia de:

$$y_{s22} = -\text{Im}(y_{3B}) = j2.527$$

$$\lambda_{s22} = 0.06\lambda$$



Adaptación: stub doble

Intersecciones entre círculos

Para encontrar los puntos y_{2A} e y_{2B} nuevamente se puede usar la función `imped_match_find_circle_intersections_helper`, para lo cual es necesario obtener los centros y radios del círculo auxiliar y del círculo $G = \text{Re}(y_1)$. Una forma es copiar los valores en x e y de cada círculo, y operar con ellos.

```
1 [h1,hsm1] = circle(adapt,f0,'R',real(y1));  
2 x1 = h1.XData;  
3 y1 = h1.YData;
```

Adaptación: stub doble

Tarea 3

Adapte una carga de $150\ \Omega$ a una línea de $50\ \Omega$ utilizando la técnica de dos stubs en paralelo, colocando el primer stub a $0.375\ \lambda$ desde la carga y con una separación entre ambos de $\lambda/8$. Implemente ambos stubs en circuito abierto.

Referencias

- [Mat16] MathWorks. *RF Toolbox: User's Guide (R2016a)*. The MathWorks, Natick, MA, USA, 2016.
- [Poz05] David M Pozar. *Microwave engineering; 3rd ed*. Hoboken, NJ: Wiley, 2005.