

 Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba Departamento Electrónica	Electrónica Aplicada III	Curso
	Gaido – Pesce – Socci	5R2

Trabajo Práctico de Laboratorio N°5

Amplificador de Potencia

Materia: Electrónica Aplicada III

Profesor: Ing. Oros

Integrantes:

Gaido Román 48014

Pesce Nicolás 48781

Socci Nahuel 48012

 Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba Departamento Electrónica	Electrónica Aplicada III	Curso
	Gaio – Pesce – Socci	5R2

Enunciado

1. Armar un amplificador de potencia de gran eficiencia que cumpla con las siguientes especificaciones:

Especificaciones:

- A. Δf = a elección
- B. $V_{cc} = 12V$
- C. $R_L = 50\Omega$
- D. $P_{Lmin} = 2\text{ W}$
- E. P_{in} = salida del modulador de FM en VHF

2. Efectuar las siguientes mediciones:

- A. Medir y graficar la potencia de la carga en función de la frecuencia.
- B. ROE en la carga

Nota: Deberá utilizarse una plaqueta impresa de fibra de vidrio.

 Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba Departamento Electrónica	Electrónica Aplicada III	Curso
	Gaio – Pesce – Socci	5R2

Cálculo de la ganancia

La ganancia es la relación entre la potencia de salida y la de entrada:

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{2W}{1mW} = 2000$$

Expresado en dB es:

$$G|_{dB} = 10 \cdot \log(G) = 10 \cdot \log(2000) = 33dB$$

Se utilizarán cuatro etapas para lograr esta ganancia

2N3866

Se diseñará el amplificador con:

$$V_{CC} = 15V, f_0 = 90MHz$$

Para $V_{cc} = 12,5V$ y $f = 136MHz$:

$$Z_{IN} = 6,2 - j11,6$$

$$Z_{OL}^* = 47,7 - j41,7$$

Se asumirá la siguiente ganancia de potencia:

$$G_P = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = \frac{2W}{0,4W} = 5$$

$$G_P|_{dB} = 10 \cdot \log 5 \cong 7dB$$

$$Z_L = \frac{V_{CE}^2}{P_{OUT}} = \frac{\left(\frac{15}{\sqrt{2}}\right)^2}{2} = 56,25\Omega, \text{ que es la impedancia que "ve" el transistor para 2W}$$

La tensión aproximada de entrada se calcula a partir de:

$$P_{IN} = \frac{\left(\frac{V_P}{\sqrt{2}}\right)^2}{\Re\{Z_{IN}\}} \Rightarrow V_P = \sqrt{2 \cdot P_{IN} \cdot \Re\{Z_{IN}\}} = \sqrt{2 \cdot 0,4 \cdot 6,2} = 2,22V$$

La corriente eficaz en el circuito de salida es:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{P_{OUT}}{R_L}} = \sqrt{\frac{2}{56,25}} = 0,19A$$

 Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba Departamento Electrónica	Electrónica Aplicada III	Curso
	Gaido – Pesce – Socci	5R2

2N4427

Potencia requerida para entregar al 2N3866:

$$P_R = P_N + 0,5dB = 0,4W \cdot 1,12 = 0,45W$$

Donde se asume que la pérdida de inserción de la red adaptadora será: 0,5 dB=1,12

Parámetros S del 2N4427

$$V_{CE} = 12V$$

$$I_C = 50mA$$

$$f = 100MHz$$

$$S_{11} = 0,75 \angle -171^\circ$$

$$S_{12} = 0,02 \angle 49^\circ$$

$$S_{21} = 13,1 \angle 94^\circ$$

$$S_{22} = 0,20 \angle -69^\circ$$

Utilizando el programa IMP-CVT y los parámetros S se puede hallar impedancia de entrada y de salida para señales débiles:

$$Z_O = 53,5 - j20$$

$$Z_{IN} = 7,2 - j3,9$$

A partir de Z_O , se obtiene:

$$V_O = \sqrt{2 \cdot P_R \cdot \Re\{Z_O\}} = \sqrt{2 \cdot 0,45W \cdot 53,5\Omega} = 6,94V_{ef}$$

$$I_{CQ} = \frac{V_O}{\Re\{Z_O\}} = \frac{6,94V}{53,5\Omega} = 0,130A$$

Se utilizará $V_{CE} = 12V$

$$P_C = V_{CE} \cdot I_{CQ} = 12V \cdot 0,130A = 1,56W$$

Asumiremos en esta etapa una ganancia de potencia:

$$G_P = 5$$

$$G_P|_{dB} = 10 \cdot \log(5) = 7$$

La potencia de entrada de esta etapa deberá ser:

$$P_{IN} = \frac{P_C}{G_P} = \frac{1,56}{5} = 0,312W$$

A partir de Z_{in} se obtiene:

$$V_{in} = \sqrt{2 \cdot P_{in} \cdot \Re\{Z_{in}\}} = \sqrt{2 \cdot 0,312W \cdot 7,2\Omega} = 2,12V$$

 Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba Departamento Electrónica	Electrónica Aplicada III	Curso
	Gaio – Pesce – Socci	5R2

BFR96

Potencia requerida para entregar al 2N4427:

$$P_R = P_N + 0,5dB = 0,312W \cdot 1,12 = 0,35W$$

Donde se asume que la pérdida de inserción de la red adaptadora será: 0,5 dB=1,12

Parámetros S del BFR96

$$V_{CE} = 5V$$

$$I_C = 10mA$$

$$f = 100MHz$$

$$S_{11} = 0,51 \angle -95^\circ$$

$$S_{12} = 0,047 \angle 54^\circ$$

$$S_{21} = 15,04 \angle 121^\circ$$

$$S_{22} = 0,58 \angle -48^\circ$$

Utilizando el programa IMP-CVT y los parámetros S se puede hallar impedancia de entrada y de salida para señales débiles:

$$Z_{IN} = 27,4 - j37,7$$

$$Z_O = 59,2 - j76,9$$

A partir de Z_O , se obtiene:

$$V_O = \sqrt{2 \cdot P_r \cdot \Re\{Z_O\}} = \sqrt{2 \cdot 0,35W \cdot 59,2\Omega} = 6,48V$$

$$I_{CQ} = \frac{V_O}{\Re\{Z_O\}} = \frac{6,48V}{59,2\Omega} = 109mA$$

Se utilizará $V_{CE} = 5V$

$$P_C = V_{CE} \cdot I_{CQ} = 5V \cdot 109mA = 545mW$$

Calculamos la máxima ganancia que puede tener el transistor:

$$G_{Pmáx} = \frac{|S_{21}|^2}{(1 - |S_{11}|^2)(1 - |S_{22}|^2)} = \frac{15,04^2}{(1 - 0,51^2)(1 - 0,58^2)} = 460,7$$

$$G_{Pmáx}|_{dB} = 26,6dB$$

Análisis del factor de estabilidad de Rollet

$$K = \frac{1 + |D|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2|S_{12}S_{21}|} > 1$$

$$D = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21} = 0,52 \angle -27,1^\circ$$

$$K = 0,47 < 1$$

No se cumple que el factor de Rollet sea mayor que 1, por lo que habrá que diseñar una red de neutralización, con lo que la ganancia total del circuito se reducirá.

Se asumirá una ganancia de potencia:

$$G = 40$$

La potencia de entrada de esta etapa deberá ser:

$$P_{in} = \frac{P_C}{G} = \frac{545mW}{40} = 13,6mW$$

A partir de Z_{in} se obtiene:

$$V_{in} = \sqrt{2 \cdot P_{in} \cdot \Re\{Z_{in}\}} = \sqrt{2 \cdot 13,6mW \cdot 27,4\Omega} = 863mV$$

 Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba Departamento Electrónica	Electrónica Aplicada III	Curso
	Gaido – Pesce – Socci	5R2

BFR90

Potencia requerida para entregar al BFR96:

$$P_R = P_N + 0,5dB = 13,6mW \cdot 1,12 = 15,23mW$$

Donde la pérdida de inserción de la red adaptadora, se asume será: 0,5 dB=1,12

Parámetros S del BFR90

$$\begin{aligned}
 V_{CE} &= 5V & S_{11} &= 0,33 \angle -75^\circ \\
 I_C &= 10mA & S_{12} &= 0,04 \angle 65^\circ \\
 f &= 200MHz & S_{21} &= 12,33 \angle 115^\circ \\
 & & S_{22} &= 0,64 \angle -25^\circ
 \end{aligned}$$

Utilizando el programa IMP-CVT y los parámetros S se puede hallar impedancia de entrada y de salida para señales débiles:

$$Z_{in} = 47,5 - j34$$

$$Z_o = 118 - j108$$

A partir de Z_o , se obtiene:

$$V_o = \sqrt{2 \cdot P_r \cdot \Re\{Z_o\}} = \sqrt{2 \cdot 15,23mW \cdot 118\Omega} = 1,89V$$

$$I_{CQ} = \frac{V_o}{\Re\{Z_o\}} = \frac{1,89V}{118\Omega} = 16mA$$

Se utilizará $V_{CE} = 5V$

$$P_C = V_{CE} \cdot I_{CQ} = 5V \cdot 16mA = 80mW$$

Calculamos la máxima ganancia que puede tener el transistor:

$$G_{Pmáx} = \frac{|S_{21}|^2}{(1 - |S_{11}|^2)(1 - |S_{22}|^2)} = \frac{12,33^2}{(1 - 0,33^2)(1 - 0,64^2)} = 289$$

$$G_{Pmáx}|_{dB} = 24,6dB$$

Análisis del factor de estabilidad de Rollet

$$K = \frac{1 + |D|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2|S_{12}S_{21}|} > 1$$

$$D = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21} = 0,5 \angle -25^\circ$$

$$K = 0,74 < 1$$

No se cumple que el factor de Rollet sea mayor que 1, por lo que habrá que diseñar una red de neutralización, con lo que la ganancia total del circuito se reducirá.

Se asumirá una ganancia de potencia:

$$G = 15$$

La potencia de entrada de esta etapa deberá ser:

$$P_{in} = \frac{P_C}{G} = 1mW$$



Polarización de los Transistores

2N3866

Clase C

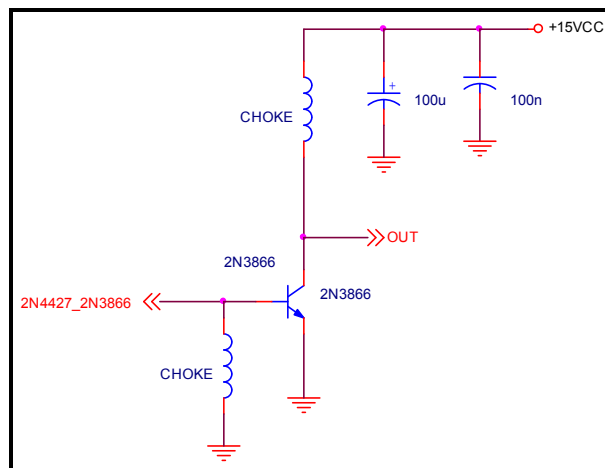
$$V_{CEQ} = 15V$$

$$I_{Cmáx} = \frac{V_{CE}}{\Re\{Z_O\}} = \frac{15V}{56,25\Omega} = 0,26A$$

Reactancia del Choke de RF:

$$X_{LRFch} = 10 \cdot Z_L = 10 \cdot 56,25\Omega = 562,5\Omega$$

$$L_{RFch} = \frac{X_{LRFch}}{2\pi \cdot f_{min}} = 1\mu H$$



2N4427

Clase A

$$V_{RE3} = V_{CC} - V_{CEQ} = 15V - 12V = 3V$$

$$I_{CQ} = 100mA$$

$$R_{E3} = \frac{V_{RE3}}{I_{CQ}} = \frac{3V}{100mA} = 30\Omega \Rightarrow R_{E3} = 33\Omega$$

Según la hoja de datos, $h_{FE} = 10$

$$R_b = \frac{h_{FE} \cdot R_{E3}}{10} = 33\Omega$$

$$V_{bb} = I_{CQ} \left(\frac{R_b}{h_{FE}} + R_{E3} \right) + V_{be} = 100mA \cdot 36,3\Omega + 0,7V = 4,33V$$

$$R_5 = R_b \cdot \frac{V_{cc}}{V_{bb}} = 33\Omega \cdot \frac{15V}{4,33V} = 114\Omega \Rightarrow R_5 = 120\Omega$$

	Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba Departamento Electrónica	Electrónica Aplicada III	Curso
		Gaio – Pesce – Socci	5R2

Según la hoja de datos, $h_{FE} = 25$

$$R_b = \frac{h_{FE} \cdot R_{E1}}{10} = \frac{25 \cdot 820\Omega}{10} = 2050\Omega$$

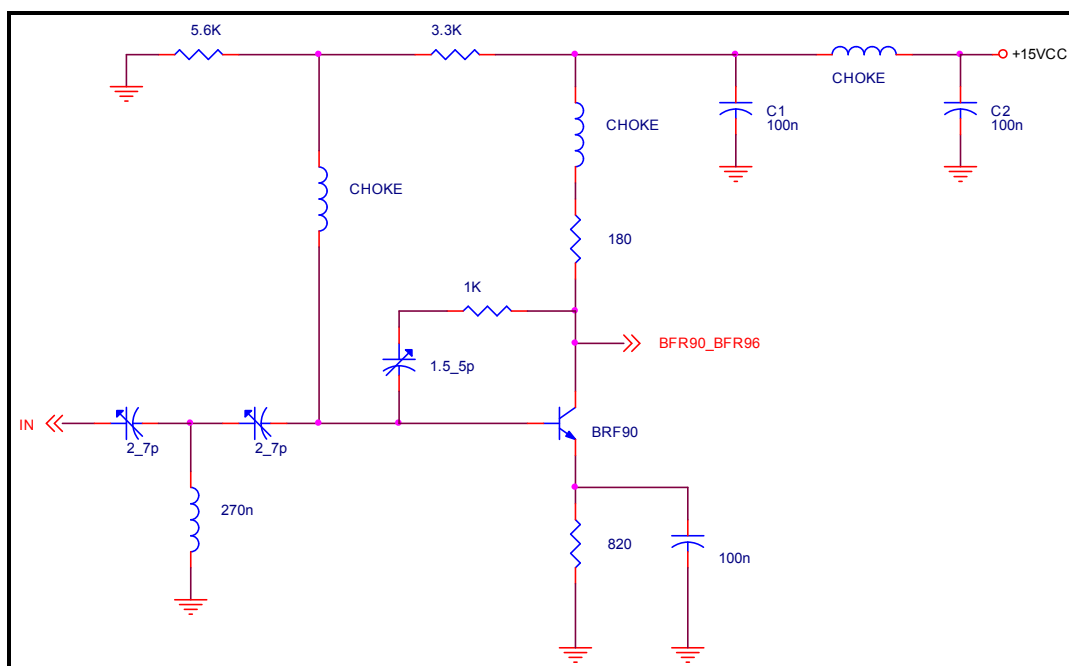
$$V_{bb} = I_{CQ} \left(\frac{R_b}{h_{FE}} + R_{E2} \right) + V_{be} = 10mA \cdot 902\Omega + 0,7V = 9,72V$$

$$R_1 = R_b \frac{V_{CC}}{V_{bb}} = 2050\Omega \frac{15V}{9,72V} = 3,16k\Omega \Rightarrow R_1 = 3,3k\Omega$$

$$R_2 = \frac{R_b}{1 - \frac{V_{bb}}{V_{CC}}} = \frac{2050\Omega}{1 - \frac{9,72V}{15V}} = 5,82k\Omega \Rightarrow R_2 = 5,6k\Omega$$

El capacitor de desacople de emisor:

$$C_{E1} \geq \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot \frac{R_{E1}}{10}} = \frac{1}{2\pi \cdot 90MHz \cdot \frac{820\Omega}{10}} = 21,6pF \Rightarrow C_{E1} = 100nF$$

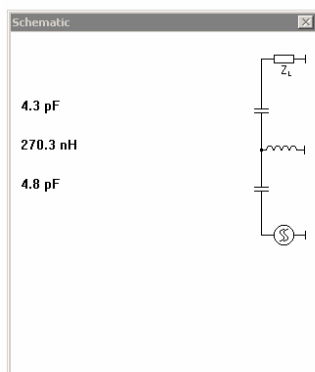




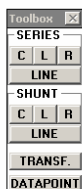
Redes de Adaptación

Para calcular las redes de adaptación se utilizó el software Smith-Chart V1.91.

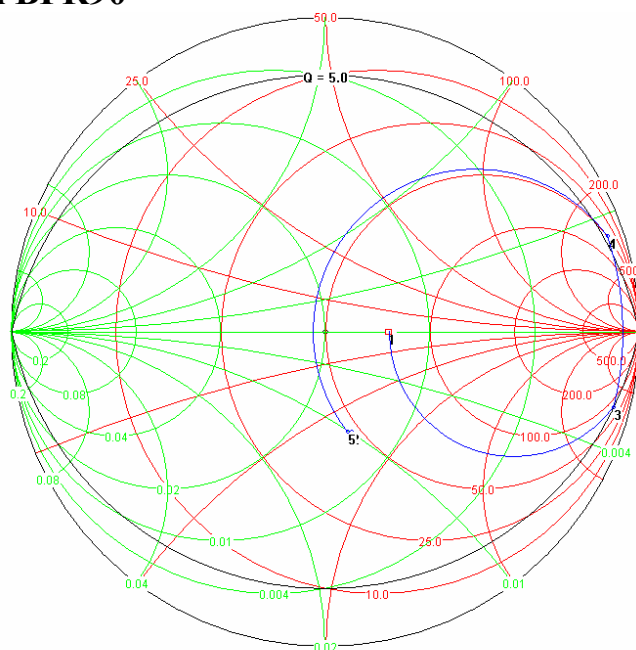
Adaptación entre la fuente de 75Ω y el BFR90



Data Points	
DP-Nr. 1	$[75.0 + j0.0]\Omega$
DP-Nr. 2	$[47.5 - j34.0]\Omega$
DP-Nr. 3	$[75.0 - j372.4]\Omega$
DP-Nr. 4	$[46.4 + j295.1]\Omega$
DP-Nr. 5	$[46.4 - j33.1]\Omega$

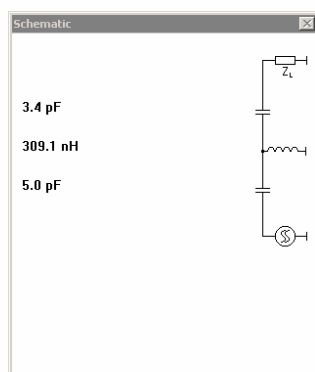


Z_0
50.0 Ohm



VSWR	0	r	Y	Z
110.2 : 1	37.82	$0.98 \angle -136.67^\circ$	$0.0013 + j0.0503$	$0.53 - j19.86$

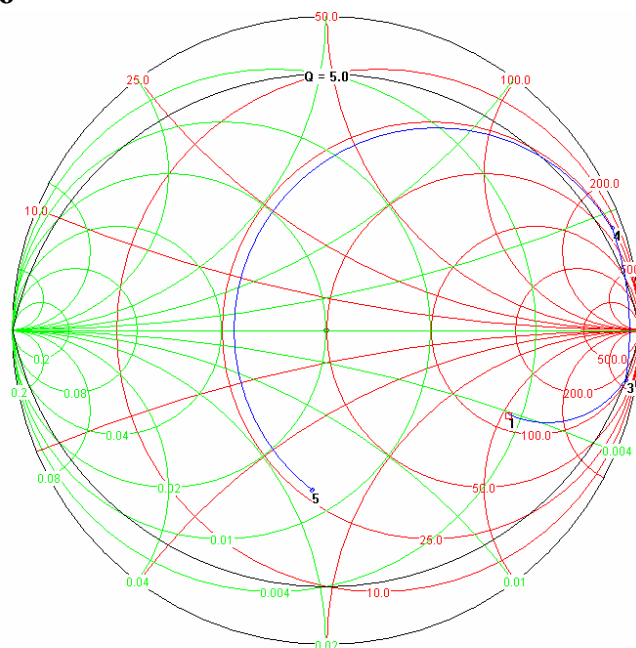
Adaptación entre el BFR90 y el BFR96



Data Points	
DP-Nr. 1	$[118.0 - j108.0]\Omega$
DP-Nr. 2	$[27.4 - j37.7]\Omega$
DP-Nr. 3	$[118.0 - j581.1]\Omega$
DP-Nr. 4	$[27.2 + j283.4]\Omega$
DP-Nr. 5	$[27.2 - j37.6]\Omega$



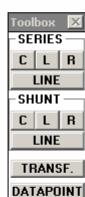
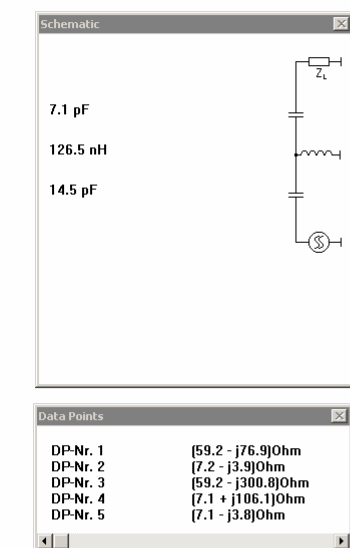
Z_0
50.0 Ohm



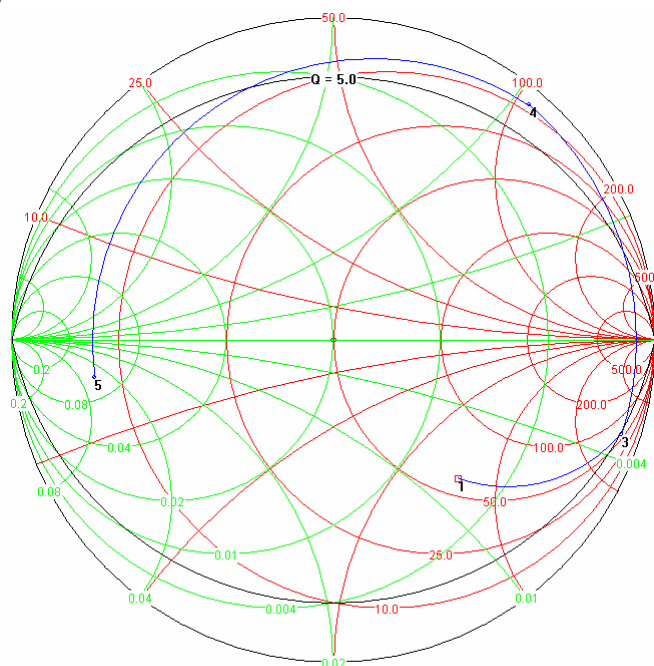
VSWR	0	r	Y	Z
10.1 : 1	4.38	$0.82 \angle -118.99^\circ$	$0.0075 + j0.0327$	$6.63 - j29.07$



Adaptación entre el BFR96 y el 2N4427

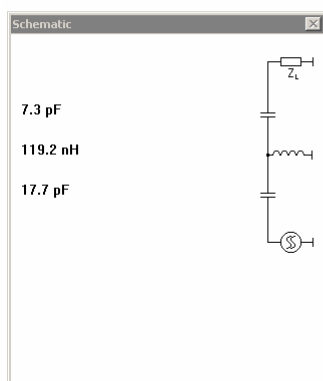


Z_0
50.0 Ohm

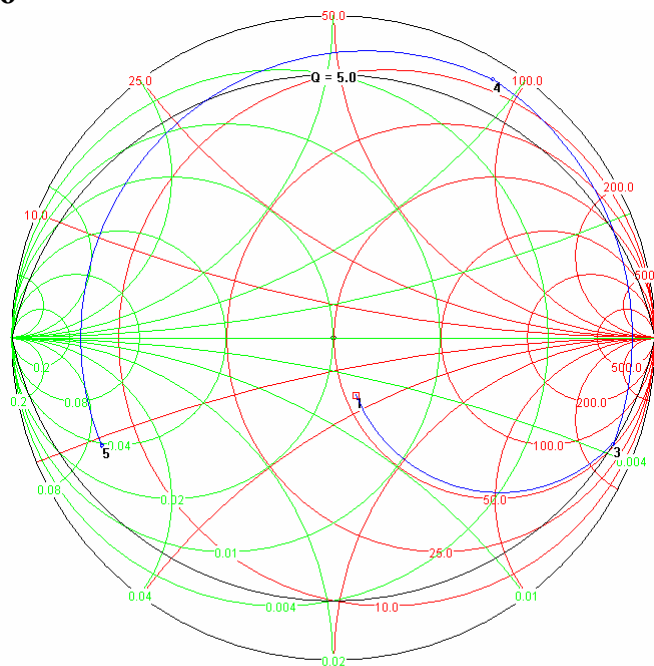


VSWR 128.7 : 1 Q 31.67 r 0.98 / 150.52° Y 0.0024 - j0.0760 Z 0.42 + j13.15

Adaptación entre el 2N4427 y el 2N3866



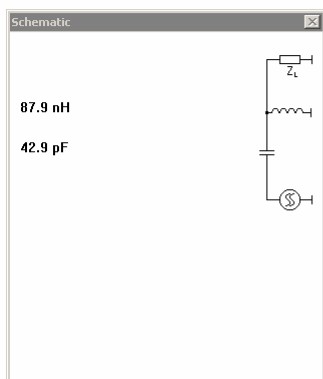
Z_0
50.0 Ohm



VSWR 971.6 : 1 Q 358.28 r 1.00 / -132.48° Y 0.0001 + j0.0454 Z 0.06 - j22.01



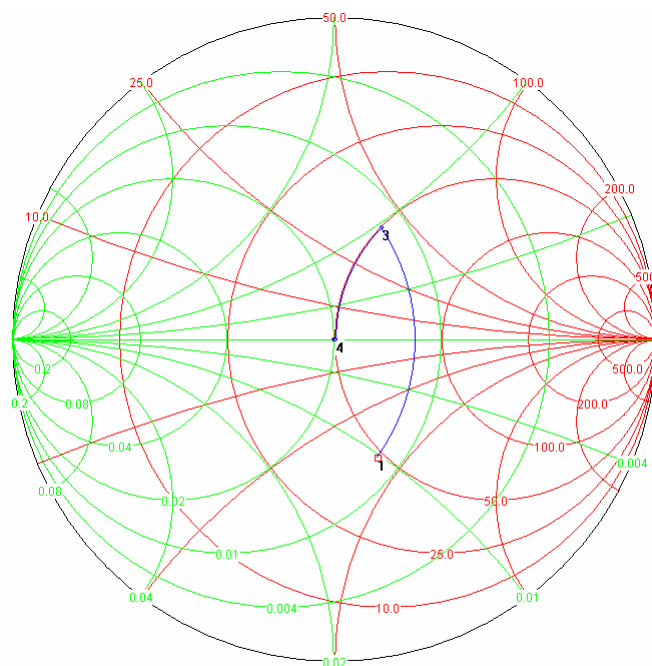
Adaptación entre el 2N3866 y la carga de 50Ω



Data Points	
DP-Nr. 1	(47.7 - j41.7) Ohm
DP-Nr. 2	(50.0 + j0.0) Ohm
DP-Nr. 3	(50.4 + j41.2) Ohm
DP-Nr. 4	(50.4 + j0.0) Ohm

Toolbox	
SERIES	
C	L R
LINE	
SHUNT	
C	L R
LINE	
TRANSF.	
DATAPOINT	

Z_0
50.0 Ohm



VSWR	Q	r	Y	Z
13.9 : 1	5.26	0.87 / -130.49°	0.0080 + j0.0421	4.36 - j22.91

Conclusión

Este práctico nos sirvió para hacer nuestra primera experiencia con un circuito de RF de potencia. Fue bastante difícil lograr que el mismo no oscilara, ya que la señal se realimentaba por la masa. Además, sintonizar las redes adaptadoras fue complicado, debido a que no se pueden medir inductancias tan pequeñas con un puente de los que se disponen en el laboratorio. Debimos utilizar el software RFSim99, en el cual introduciendo el número de vueltas y el largo de la bobina, obteníamos el valor de la inductancia. También tuvimos problemas con el acoplamiento magnético entre etapas, por lo que recurrimos a blindajes entre ellas.