



# Universidad Nacional de Córdoba

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Electrónica Analógica III

Trabajo Práctico N° 1

Nombre	DNI
Clemeniz Jeremías	43449566

Docentes	Ing. Rodrigo Bruni
	Ing. José Amado
	Ing. Federico Dadam

Córdoba, República Argentina  
25 de marzo de 2024

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>4</b>
<b>2. Marco teórico</b>	<b>5</b>
<b>3. Desarrollo</b>	<b>8</b>
3.1. Rerequerimientos . . . . .	8
3.2. Diseño . . . . .	8
3.2.1. Calculo de resistencias . . . . .	9
3.2.2. Calculo del capacitor . . . . .	10
3.3. Simulacion . . . . .	11
3.4. Seleccin de componentes y armado . . . . .	12
<b>4. Mediciones</b>	<b>13</b>
4.1. Medicion de $f_o$ . . . . .	13
4.2. Medicion de $BW$ . . . . .	15
4.3. Medicion de $R_p$ . . . . .	15
4.4. Medicion de $Z_{in}$ . . . . .	16
4.5. Medicion de $Z_{out}$ . . . . .	16
<b>5. Conclusiones</b>	<b>17</b>

## Índice de figuras

1.	Circuito resonante LC . . . . .	5
2.	Circuito de acoplamiento interetapas LC modificado . . . . .	5
3.	Auto transformador . . . . .	6
4.	Esquema de relación de transformación . . . . .	6
5.	Circuito reflejado . . . . .	7
6.	Curva de Nagaoka K . . . . .	9
7.	Circuito simulado en LTSpice . . . . .	11
8.	Respuesta en frecuencia del circuito simulado . . . . .	11
9.	Análisis de montecarlo . . . . .	12
10.	PCB montada . . . . .	12
11.	PCB montada . . . . .	13
12.	Medición de $f_o$ . . . . .	14
13.	Medición de $f_{o2}$ . . . . .	14
14.	Medición de $BW$ . . . . .	15
15.	Medición de $R_p$ . . . . .	15
16.	Medición de $Z_{in}$ . . . . .	16
17.	Medición de $Z_{out}$ . . . . .	17
18.	Medición de $Z_{out}$ . . . . .	17

## Índice de tablas

## 1. Introducción

En el trabajo practico N° 1 se realizara el estudio de un circuito de acoplamiento interetapas. Los circuitos interetapa se utilizan en sistemas de comunicacion para adaptar impedancia y sintonizar en una frecuencia determinada, permitiendo maxima transferencia de energia entre etapas. En el practico construiremos el circuito resonante, armando la bobina y utilizando capacitores comerciales, donde tendremos que cumplir valores de frecuencia central, ancho de banda, factor de calidad e impedancia de entrada y salida.

## 2. Marco teórico

Un circuito resonante esta compuesto por una bobina y un capacitor (Figura 1), en el cual se produce una resonancia en una frecuencia determinada. La frecuencia de resonancia es aquella en la cual la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva son iguales, por lo que la impedancia del circuito es puramente resistiva.

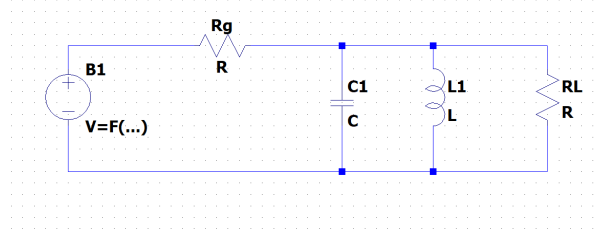


Figura 1: Circuito resonante LC

La frecuencia de resonancia o frecuencia central ( $f_0$ ) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

Podemos definir el factor de calidad cuando el circuito esta cargado ( $Q_c$ ) y cuando el circuito esta descargado ( $Q_d$ ). Se pueden calcular mediante las siguientes ecuaciones:

$$Q_c = \frac{f_0}{BW} = \frac{R_T}{X_L} \quad (2)$$

$$Q_d = \frac{R_P}{X_L} \quad (3)$$

Donde  $R_T$  es la resistencia total,  $R_P$  es la resistencia paralelo,  $X_L$  es la reactancia inductiva y  $BW$  es el ancho de banda.  $R_T$  define el factor de calidad del circuito cuando esta cargado, y  $R_P$  cuando esta descargado. Y  $R_T$  se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$R_T = R_P \parallel R_L \parallel R_g \quad (4)$$

Modificaremos el circuito de la figura 1, para obtener el circuito de acoplamiento interetapas (Figura 2).

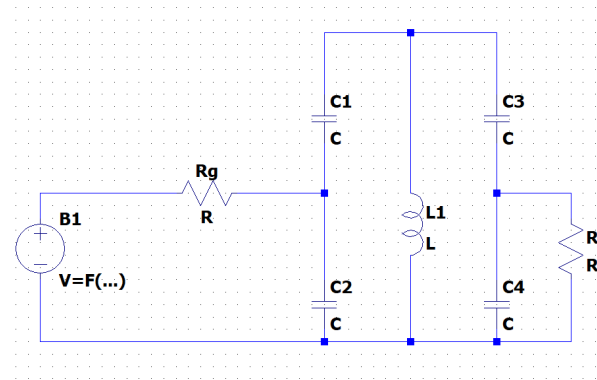


Figura 2: Circuito de acoplamiento interetapas LC modificado

El circuito de la figura 2 tiene la misma frecuencia central que el circuito de la figura 1. Si calculamos la capacidad total, obtendremos la misma que la del circuito de la figura 1.

$$C_T = \frac{C1 \cdot C2}{C1 + C2} + \frac{C3 \cdot C4}{C3 + C4} = \frac{C}{2} + \frac{C}{2} \quad (5)$$

Analizando la salida del circuito de la figura 2, podemos interpretarla como un auto transformador:

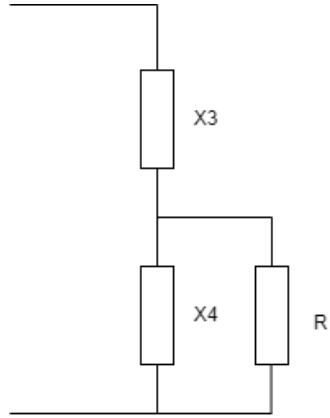


Figura 3: Auto transformador

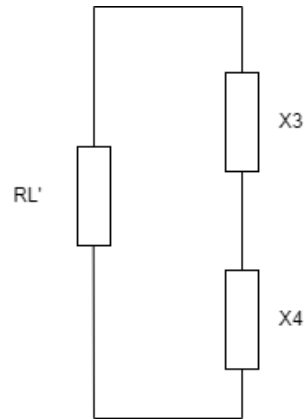


Figura 4: Esquema de relación de transformación

Del autotransformador podemos obtener la relación de transformación:

$$R'_L = \left(1 + \frac{X_3}{X_4}\right)^2 \cdot R_L \quad (6)$$

Finalmente, el circuito reflejado de la figura 2 queda como se muestra en la figura 5:

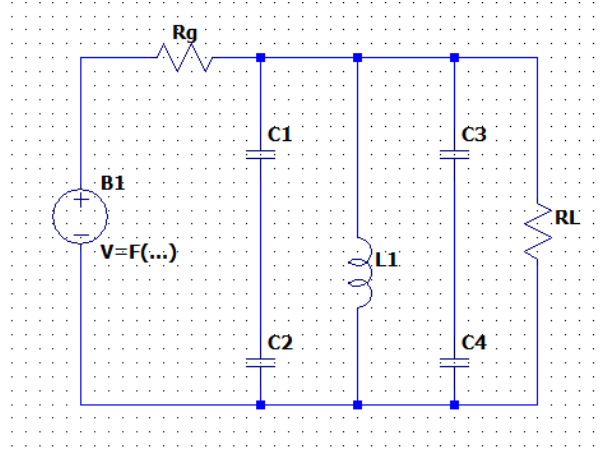


Figura 5: Circuito reflejado

Donde nos queda una resistencia total de:

$$R_T = R'_g \parallel R'_L \parallel R_P \quad (7)$$

Donde  $R'_g$  es la resistencia del generador reflejada,  $R'_L$  es la resistencia de carga reflejada y  $R_P$  es la resistencia paralelo. Finalmente nos quedara:

$$R_T = X_L \cdot Q_c = R'_g \parallel (R'_L \parallel R_P) = 2R_T \parallel 2R_T \quad (8)$$

Retomando el concepto de auto transformador, podemos demostrar que la reflexion de  $R_L$  y  $R_g$  al primario. El procedimiento lo realizaremos solamente con  $R_L$ , ya que el procedimiento es el mismo para  $R_g$ . Sabemos que la relacion de transformacion en la figura 3 es:

$$n = \frac{X_3 + X_4}{X_4} = 1 + \frac{X_3}{X_4} = \frac{V_{34}}{V_4} = \frac{I_4}{I_{34}} \quad (9)$$

Si elevamos al cuadrado la ecuacion 9, obtenemos:

$$n^2 = \left(1 + \frac{X_3}{X_4}\right)^2 = \frac{V_{34}}{V_4} \cdot \frac{I_4}{I_{34}} = R'_L / R_L \quad (10)$$

Despejando  $R'_L$ , obtenemos:

$$R'_L = n^2 \cdot R_L = \left(1 + \frac{X_3}{X_4}\right)^2 \cdot R_L = \left(1 + \frac{C_3}{C_4}\right)^2 \cdot R_L \quad (11)$$

Si realizamos el mismo procedimiento con  $R_g$ , obtenemos:

$$R'_g = n^2 \cdot R_g = \left(1 + \frac{X_1}{X_2}\right)^2 \cdot R_g = \left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right)^2 \cdot R_g \quad (12)$$

Finalmente nos quedan 4 ecuaciones con 4 incognitas, las cuales son  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  y  $C_4$ .

$$\begin{cases} R'_L = \left(1 + \frac{C_3}{C_4}\right)^2 \cdot R_L \\ R'_g = \left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right)^2 \cdot R_g \\ \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{C}{2} \\ \frac{C_3 \cdot C_4}{C_3 + C_4} = \frac{C}{2} \end{cases} \quad (13)$$

Con estas ecuaciones podremos comenzar con el calculo para el diseño del circuito de acoplamiento.



### 3. Desarrollo

#### 3.1. Rerequerimientos

Para este trabajo practico se nos solicita realizar un circuito resonante que cumpla con las siguientes especificaciones:

- Frecuencia de resonancia:  $f_0 = 16MHz$
- Ancho de banda:  $BW = 1,6MHz$
- Factor de calidad con el circuito cargado:  $Q_c = 10$
- Impedancia de entrada:  $Z_{in} = 50\Omega$
- Impedancia de salida:  $Z_{out} = 1k\Omega$

#### 3.2. Diseño

El primer paso para construir el circuito resonante es realizar los calculos del inductor. Para ello, se utilizara la siguiente formula:

$$L = D^3 \cdot N_s^2 \cdot k \cdot 10^{-3} [\mu H] \quad (14)$$

Donde  $D$  es el diametro externo del inductor,  $N_s$  es el numero de espiras por unidad de longitud y  $k$  es la constante de Nagaoka. Para comenzar fijaremos valores que nos permitan ajustar a los calculos. Por lo tanto, se fija:

- $D = 2,21cm$
- diametro del conductor:  $d = 2,1 mm$
- separacion entre espiras:  $S = 3 mm$

Con estos valores, se puede calcular el numero de espiras por unidad de longitud:

$$N_s = \frac{1}{S + d} = \frac{10}{3 + 2,1} = 2 \text{ espiras/cm} \quad (15)$$

Para seguir con los calculos necesitaremos seleccionar un valor de longitud del inductor  $L$ . En la planilla de calculo se definieron valores de longitud con un paso de 0.1 cm. Finalmente seleccionamos:

- $L = 3,8 cm$

Calculamos la cantidad de espiras:

$$N = N_s \cdot L = 2 \cdot 3,8 = 7 \text{ espiras} \quad (16)$$

Tenemos que tener en cuenta que redondeamos para  $N_s$  de 1.96 a 2. Ahora calculamos la relacion de longitud con diametro:

$$\frac{L}{D} = \frac{3,8}{2,21} = 1,72 \quad (17)$$

Ahora tendremos que calcular la constante de Nagaoka, para esto hay dos formas de hacerlo. La primera es mediante la siguiente formula:

$$k = K \cdot \pi^2 \cdot \frac{L}{D} \quad (18)$$

Donde  $K$  se calcula mediante la siguiente formula:

$$K = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \frac{D}{2L} - 2 \cdot 10^{-2} \left(\frac{D}{2L}\right)^2} \quad (19)$$

Sustituyendo los valores obtenemos:

$$K = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \frac{2,21}{2 \cdot 3,8} - 0,2 \cdot 10^{-2} \left( \frac{2,21}{2 \cdot 3,8} \right)^2} = 0,79 \quad (20)$$

Y el factor de Nagaoka:

$$k = 0,79 \cdot \pi^2 \cdot 1,72 = 13,5 \quad (21)$$

La otra forma es graficamente, donde con  $L/D = 1.72$  ingresamos al siguiente grafico:

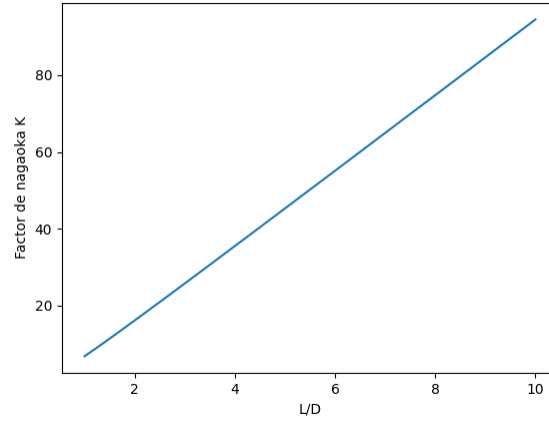


Figura 6: Curva de Nagaoka K

Con todos estos parametros calculadores, podemos calcular el valor de la inductancia:

$$L = D^3 \cdot N_s^2 \cdot k \cdot 10^{-3} = 2,21^3 \cdot 2^2 \cdot 13,5 \cdot 10^{-3} = 0,56 \mu H \quad (22)$$

### 3.2.1. Calculo de resistencias

Para el calculo de las resistencias necesitaremos calcular el factor de calidad sin carga  $Q_d$ , con la siguiente formula:

$$Q_d = 8850 \cdot \frac{D \cdot L}{102 \cdot L + 45 \cdot D} \cdot \sqrt{f_0} \quad (23)$$

Donde  $L$  es la longitud del inductor en cm,  $D$  es el diametro del inductor en cm y  $f_0$  es la frecuencia de resonancia en MHz. Sustituyendo los valores obtenemos:

$$Q_d = 610,4 \quad (24)$$

La reactancia del inductor es:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 16 \cdot 10^6 \cdot 0,56 \cdot 10^{-6} = 56 \Omega \quad (25)$$

Con  $X_L$  y  $Q_d$  podemos calcular la resistencia paralela  $R_p$ :

$$R_p = Q_d \cdot X_L = 610,4 \cdot 56 = 34300 \Omega \quad (26)$$

Con  $Q_C$  y  $X_L$  podemos calcular la resistencia total  $R_t$ :

$$R_t = \frac{X_L}{Q_c} = \frac{56}{10} = 560 \Omega \quad (27)$$

Con los valores calculados podremos calcular la resistencia de carga reflejada  $R'_L$  y la resistencia del generador reflejada  $R'_g$ , para esto tenemos que despejar  $R'_L$  y  $R'_g$  de la ecuacion 8:

$$R'_L // R_P = 2 \cdot R_T \quad (28)$$

$$R'_g = 2 \cdot R_T \quad (29)$$

Despejando  $R'_L$  obtenemos:

$$R'_L = \frac{2 \cdot R_T \cdot R_P}{R_P - 2 \cdot R_T} \quad (30)$$

Sustituyendo los valores obtenemos:

$$R'_L = \frac{2 \cdot 560 \cdot 34300}{34300 - 2 \cdot 560} = 1161,8 \, \Omega \quad (31)$$

Y calculando  $R'_G$ :

$$R'_g = 2 \cdot 560 = 1123 \, \Omega \quad (32)$$

### 3.2.2. Cálculo del capacitor

Con la frecuencia de resonancia  $f_0 = 16 \text{ MHz}$  y el valor de la inductancia calculado, podemos calcular el valor del capacitor:

$$C = \frac{1}{L \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_0)^2} = \frac{1}{0,56 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 16 \cdot 10^6)^2} = 177 \text{ pF} \quad (33)$$

Con las ecuaciones de la formula 13, podemos calcular  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  y  $C_4$ :

$$C_2 = \frac{C}{2} \cdot \sqrt{\frac{R'_g}{R_g}} \quad (34)$$

Entonces  $C_1$  sera igual a:

$$C_1 = \frac{C_2}{\sqrt{R'_g/R_g - 1}} \quad (35)$$

Con  $C_4$  y  $C_3$  nos queda:

$$C_4 = \frac{C}{2} \cdot \sqrt{\frac{R'_L}{R_L}} \quad (36)$$

$$C_3 = \frac{C_4}{\sqrt{R'_L/R_L - 1}} \quad (37)$$

Remplazando los valores obtenemos:

$$C_1 = 112 \text{ pF} \quad (38)$$

$$C_2 = 420 \text{ pF} \quad (39)$$

$$C_3 = 1225 \text{ pF} \quad (40)$$

$$C_4 = 95 \text{ pF} \quad (41)$$

### 3.3. Simulacion

Para comprobar el correcto funcionamiento de nuestro circuito, se realizo una simulacion en LTSpice. A continuacion se muestra el circuito simulado:

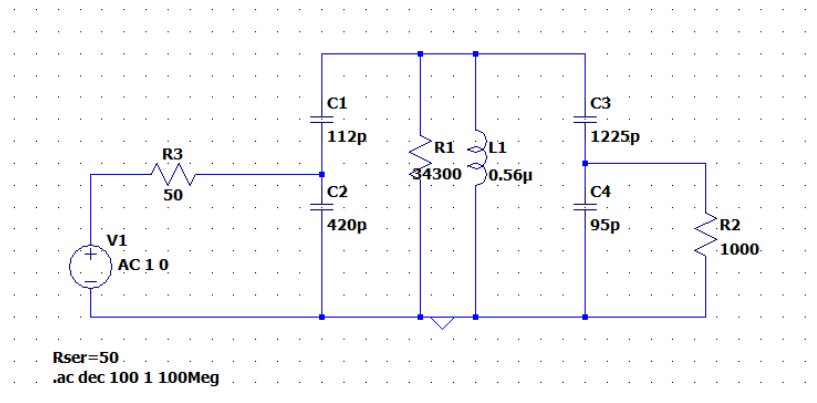


Figura 7: Circuito simulado en LTSpice

El resultado de la simulacion es el siguiente:

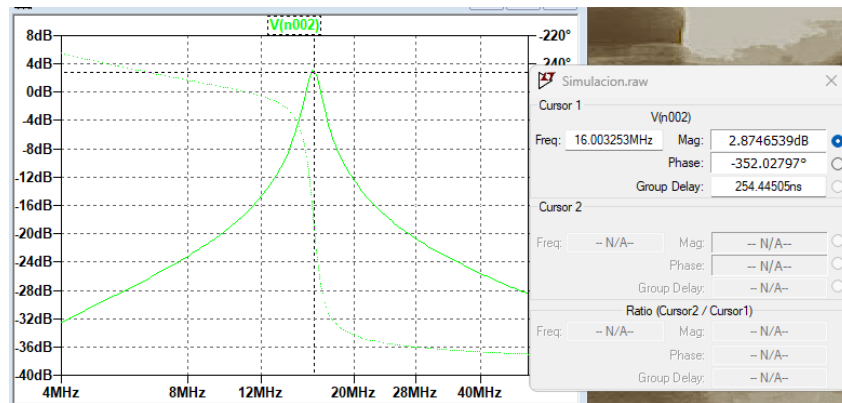


Figura 8: Respuesta en frecuencia del circuito simulado

Se observa que la frecuencia de resonancia es de  $16MHz$  con una ganancia de  $2dB$ . Ademas:

- frecuencia de corte inferior:  $15,2MHz$
- frecuencia de corte superior:  $16,8MHz$
- ancho de banda:  $1,6MHz$
- $Q_c = 10$

### 3.4. Selección de componentes y armado

El primer paso sera determinar que capacitores utilizaremos para el circuito. Los capacitores seleccionados son:

- $C_1 = 100 \text{ pF}$
- $C_2 = 330 + 100 = 430 \text{ pF}$
- $C_3 = 1000 + 100 + 100 = 1200 \text{ pF}$
- $C_4 = 100 \text{ pF}$

La capacidad total sera:

$$C_T = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} + \frac{C_3 \cdot C_4}{C_3 + C_4} \quad (42)$$

$$C_T = 173,4 \text{ pF} \quad (43)$$

El resultado obtenido con los capacitores obtenidos, haciendo un analisis de montecarlo:

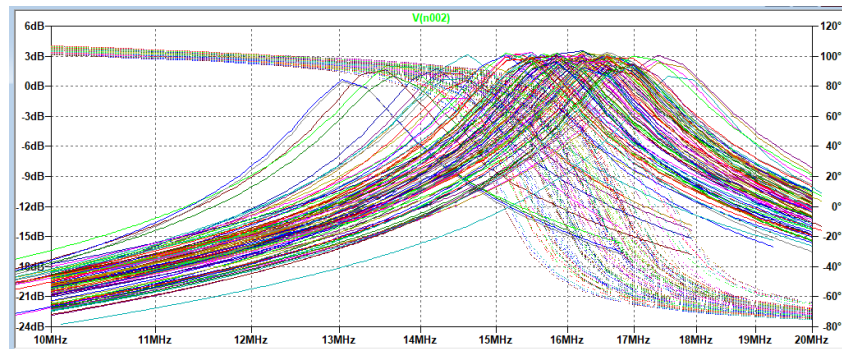


Figura 9: Analisis de montecarlo

Vemos que la tolerancia y los capacitores utilizados hace que  $f_0$  varie entre  $13\text{MHz}$  y  $17,2\text{MHz}$ . El inductor y los capacitores montados en la PCB finalmente nos queda:

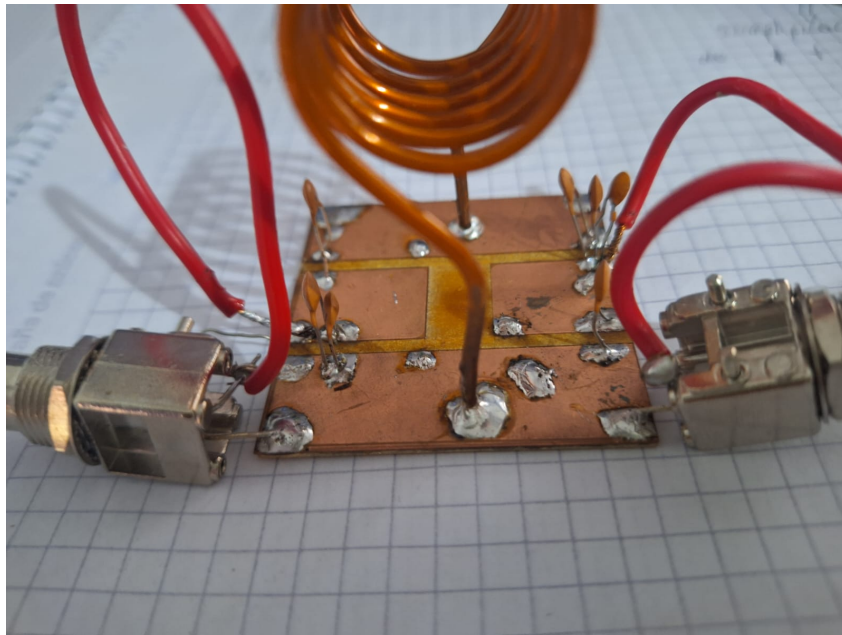


Figura 10: PCB montada

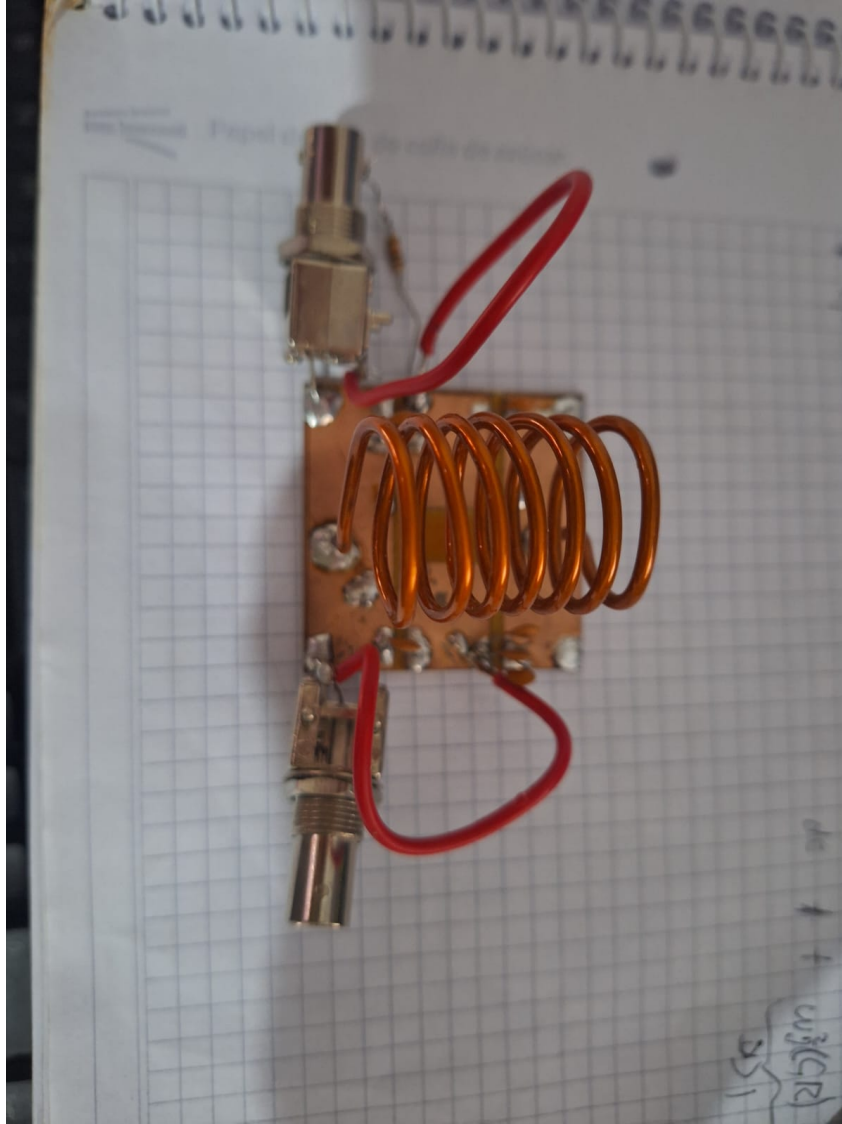


Figura 11: PCB montada

## 4. Mediciones

### 4.1. Medicion de $f_o$

Para la medicion de la frecuencia de resonancia, se conecta el circuito a tope. El esquema es el siguiente:

La resistencia  $R_{test}$  tiene que ser del orden de  $R_p$ , por lo tanto inicialmente se utilizo una resistencia de  $1k\Omega$ . Una vez realizada la conexion, se varia la frecuencia del generador de señales de menor a mayor hasta encontrar la frecuencia de resonancia. Tenemos que considerar que el osciloscopio tiene una capacidad de entrada, por lo tanto esta capacidad paracita puede afectar la medicion de la frecuencia de resonancia.

La medicion  $f_{o1}$ :

$$f_{o1} = 12MHz \quad (44)$$

A continuacion mediremos la frecuencia de resonancia  $f_{o2}$ , para esto se utilizara una resistencia de  $1k\Omega$  y ademas, se agrega el capacitor  $C_F$  en paralelo al inductor y los capacitores. El esquema es el siguiente:

La medicion  $f_{o2}$ :

$$f_{o2} = 10,5MHz \quad (45)$$

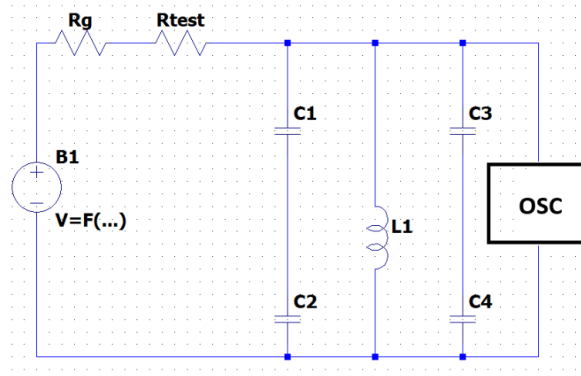


Figura 12: Medicion de  $f_o$

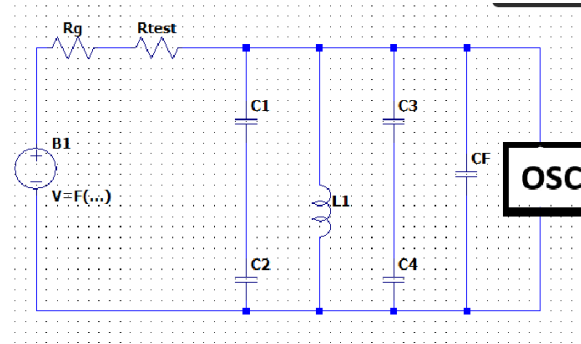


Figura 13: Medicion de  $f_{o2}$

Para obtener la frecuencia de resonancia  $f_o$  se debe obtener  $C_o$  a partir de estas ecuaciones:

$$f_{o1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_T + C_o)}} \quad (46)$$

$$f_{o2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_T + C_o + C_F)}} \quad (47)$$

Donde  $C_T$  es igual 177 pF. Despejando  $C_o$  de estas ecuaciones obtenemos:

$$\left(\frac{f_{o1}}{f_{o2}}\right)^2 = \frac{C_T + C_o + C_F}{C_T + C_o} \quad (48)$$

$$C_o = \frac{C_T \cdot (f_{o2}^2 - f_{o1}^2) + C_F f_{o2}^2}{f_{o1}^2 - f_{o2}^2} \quad (49)$$

El capacitor  $C_F$  es de 100pF y  $C_o$  es de:

$$C_o = 149,7pF \quad (50)$$

Con este valor damos cuenta que la capacidad agregada del osciloscopio es comparable al del circuito, por lo tanto modificara la medicion afecta el resultado. Ahora determinaremos el valor de la inductancia  $L$ :

$$L = \frac{1}{(2\pi f_{o1})^2} \cdot \frac{1}{C_T + C_o} = 0,54\mu H \quad (51)$$

Con este valor determinamos el valor de la frecuencia de resonancia  $f_o$ :

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C_T}} = 16,27MHz \quad (52)$$

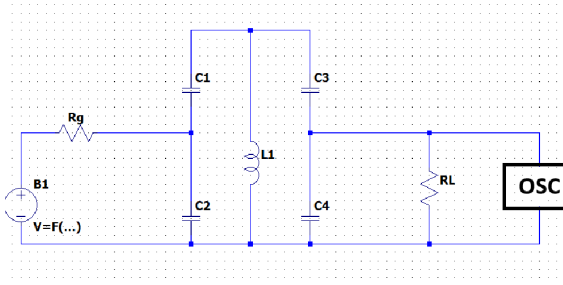


Figura 14: Medicion de  $BW$

#### 4.2. Medicion de $BW$

Para la medicion del ancho de banda, se utiliza el esquema de la figura 14:

La medicion del ancho de banda variaremos la frecuencia hasta encontrar el pico maximo de amplitud en la salida. Las mediciones son las siguientes:

Medicion	Amplitud	Ancho de banda
Frecuencia de corte inferior	2.87 V	12.2 MHz
Frecuencia central	4.06 V	12.6 MHz
Frecuencia de corte superior	2.87 V	13 MHz

El ancho de banda es:

$$BW = 13 - 12,2 = 0,8MHz \quad (53)$$

#### 4.3. Medicion de $R_p$

Para la medicion de la resistencia de perdida, se utiliza el esquema de la figura 15:

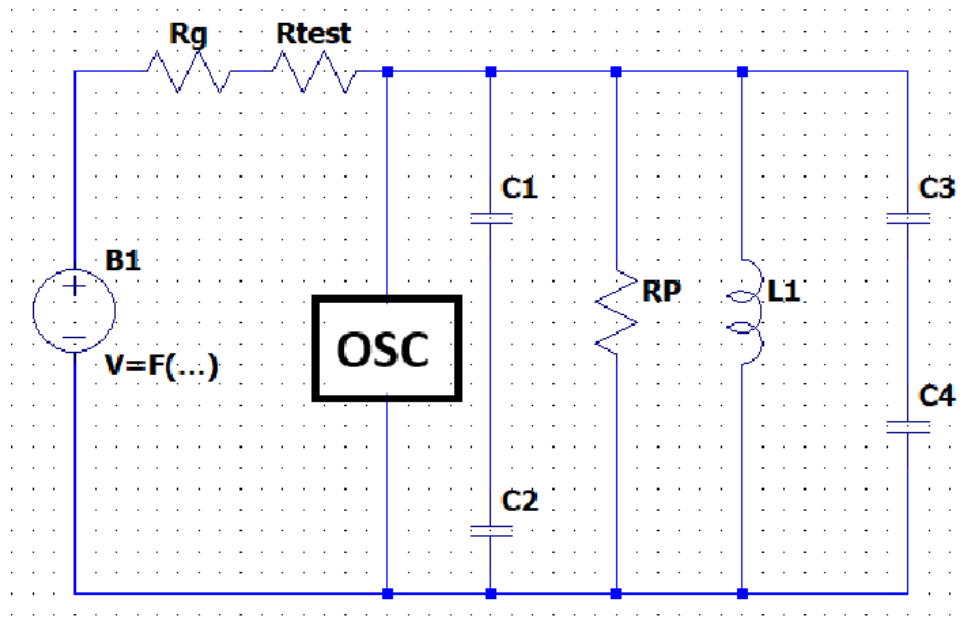


Figura 15: Medicion de  $R_p$

Tenemos que colocar la frecuencia del generador de onda en la frecuencia de resonancia  $f_o$ , ya que la reactancia inductiva y capacitiva se anulan. Por lo tanto nos quedara la resistencia de test  $R_{test} = 1k\Omega$  en serie con la resistencia de perdida  $R_p$ . Por lo tanto realizando el divisor resistivo:



$$V_{osciloscopio} = V_{B1} \cdot \frac{R_p}{R_p + R_{test}} \quad (54)$$

Y despejando  $R_p$  obtenemos:

$$R_p = \frac{R_{test} \cdot V_{osciloscopio}}{V_{B1} - V_{osciloscopio}} \quad (55)$$

Las mediciones son las siguientes:

- $V_{osciloscopio} = 2V$
- $V_{B1} = 1,86V$
- $R_p = 13,3k\Omega$

#### 4.4. Medicion de $Z_{in}$

Para la medicion de la impedancia de entrada, se utiliza el esquema de la figura 16:

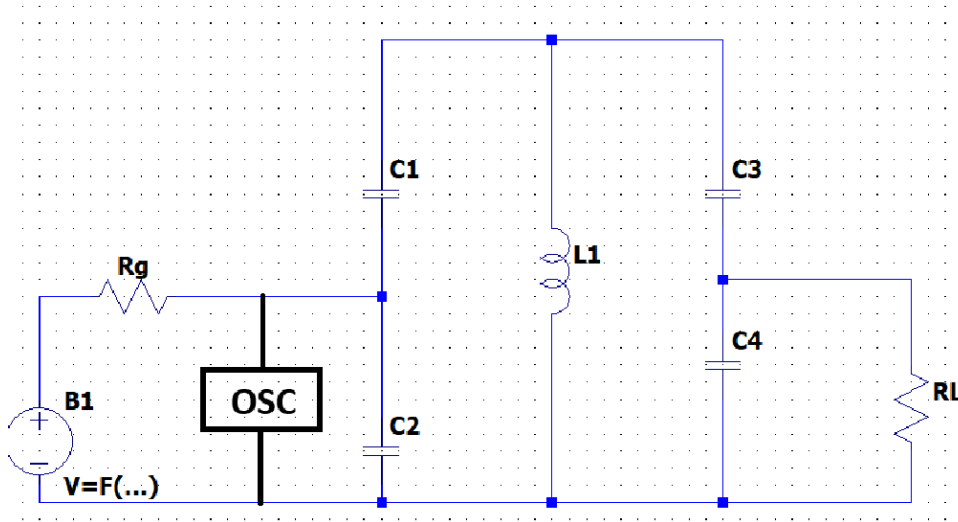


Figura 16: Medicion de  $Z_{in}$

#### 4.5. Medicion de $Z_{out}$

Para la medicion de la impedancia de salida, se utiliza el esquema de la figura ??:

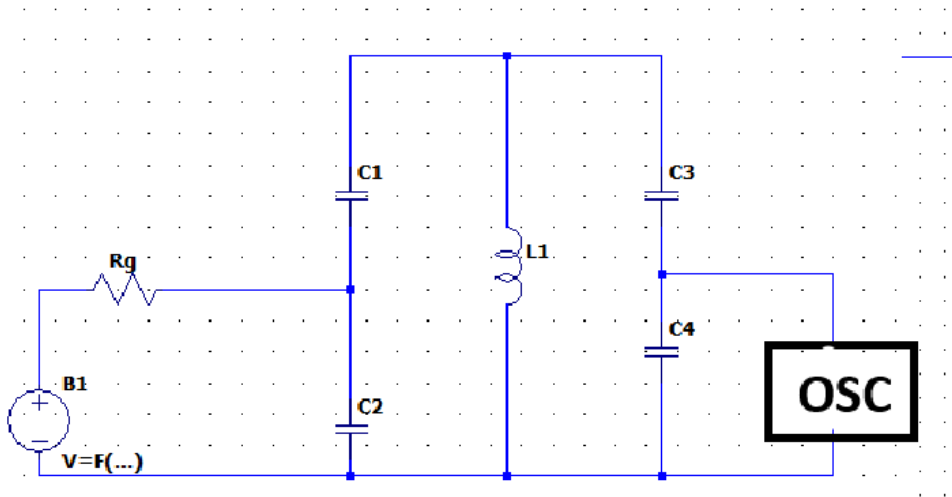


Figura 17: Medicion de  $Z_{out}$

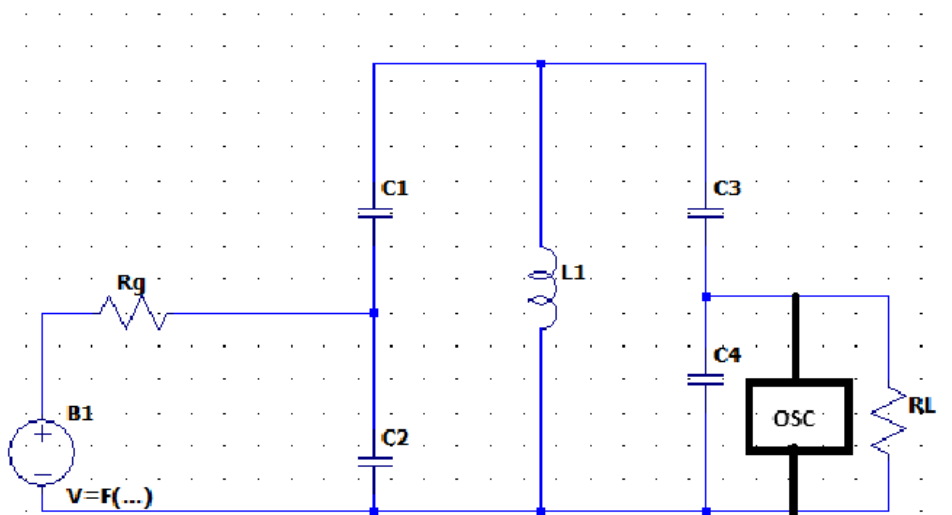


Figura 18: Medicion de  $Z_{out}$

## 5. Conclusiones

En el trabajo practico N° 1 se realizara el estudio de un circuito de acoplamiento interetapas. Los circuitos interetapa se utilizan en sistemas de comunicacion para adaptar impedancia y sintonizar en una frecuencia determinada, permitiendo maxima transferencia de energia entre etapas. En el practico construiremos el circuito resonante, armando la bobina y utilizando capacitores comerciales, donde tendremos que cumplir valores de frecuencia central, ancho de banda, factor de calidad e impedancia de entrada y salida.