



Universidad Nacional de Córdoba

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Electrónica Analógica III

Trabajo Práctico N° 1

Nombre	DNI
Clemenzen Jeremías	43449566

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

Córdoba, República Argentina
26 de marzo de 2024

Índice

1. Introducción	4
2. Marco teórico	5
3. Desarrollo	8
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
3.5. Mediciones	13
3.5.1. Medicion de f_o	13
3.5.2. Medicion de BW	15
3.5.3. Medicion de R_p	15
3.5.4. Medicion de Z_{in}	16
3.5.5. Medicion de Z_{out}	16
4. Conclusiones	17

Índice de figuras

1.	Circuito resonante LC	5
2.	Circuito de acoplamiento interetapas LC modificado	6
3.	Auto transformador	6
4.	Esquema de relación de transformación	7
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 V_g	16
17.	Medición de Z_{in}	17
18.	Medición de Z_{out}	17
19.	Medición de Z_{out}	18

Índice de tablas

1. Introducción

En el trabajo práctico N° 1 se realizará el estudio de un circuito de acoplamiento interetapas. Los circuitos interetapa se utilizan en sistemas de comunicación para adaptar impedancia y sintonizar en una frecuencia determinada, permitiendo máxima transferencia de energía entre etapas. En el práctico construiremos el circuito resonante, montando 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.

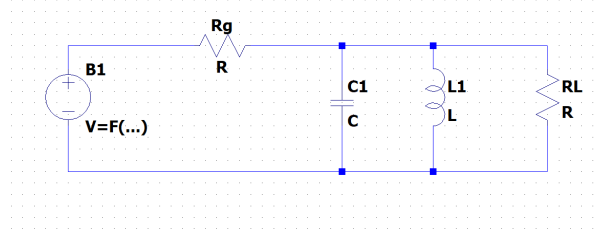


Figura 1: Circuito resonante LC

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

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

A partir de la f_0 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
- 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).

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: 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:

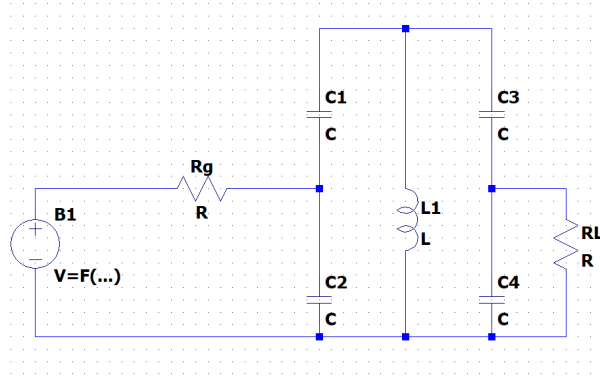


Figura 2: Circuito de acoplamiento interetapas LC modificado

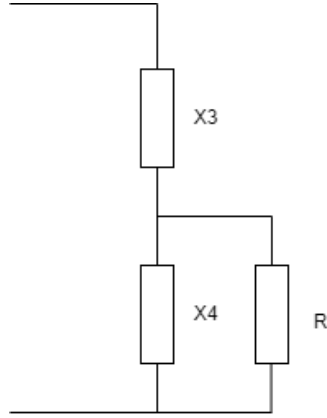


Figura 3: Auto transformador

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
- R_P es la resistencia paralelo

Podemos realizar la siguiente asignacion de valores, donde seguiremos cumpliendo la condicion de la ecuacion 7:

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

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:

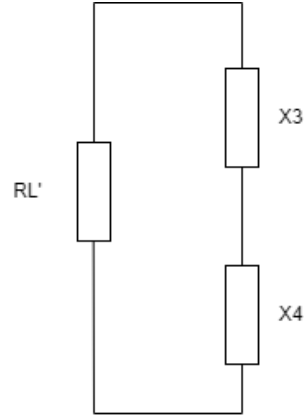


Figura 4: Esquema de relación de transformación

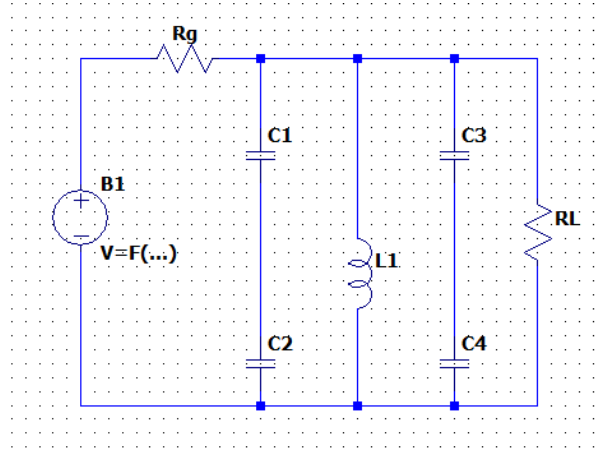


Figura 5: Circuito reflejado

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

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 incógnitas, 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 cálculo 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:

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

Donde:

- D es el diametro externo del inductor
- N_s es el numero de espiras por unidad de longitud
- k es la constante de Nagaoka

Para comenzar fijaremos parametros que podamos ajustarlos o determinarlos. Elegimos los siguientes valores:

- $D = 2,21$ cm
- 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:

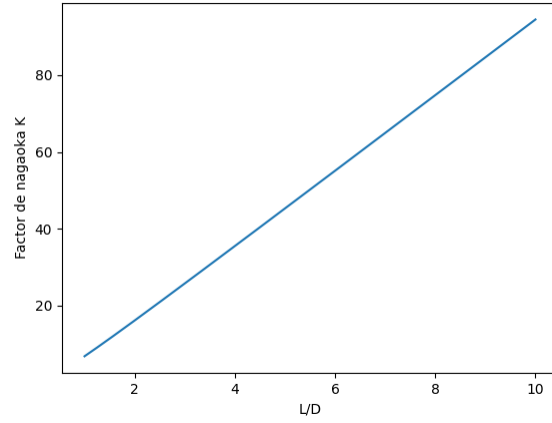


Figura 6: Curva de Nagaoka K

Donde obtendremos un valor aproximado de forma grafica.

Con todos estos parametros calculados, 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
- 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. Calculo del capacitor

Con la frecuencia de resonancia $f_0 = 16 MHz$ 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 del sistema de ecuaciones 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:

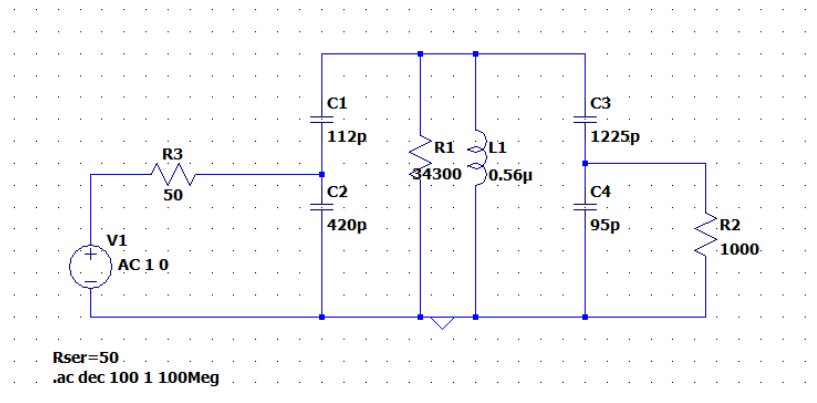


Figura 7: Circuito simulado en LTSpice

La respuesta en frecuencia obtenida del circuito simulada es la siguiente:

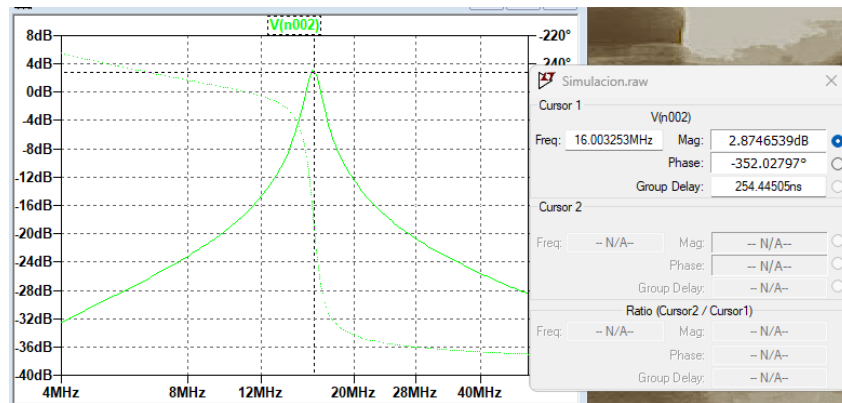


Figura 8: Respuesta en frecuencia del circuito simulado

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

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

3.4. Selección de componentes y armado

El primer paso será 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 será:

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

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

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

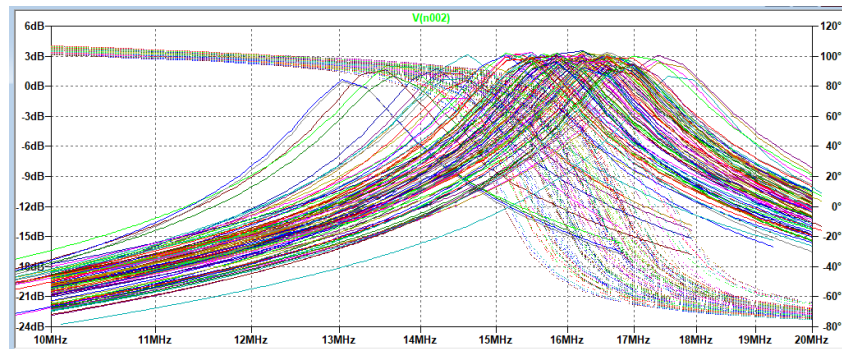


Figura 9: Analisis de montecarlo

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

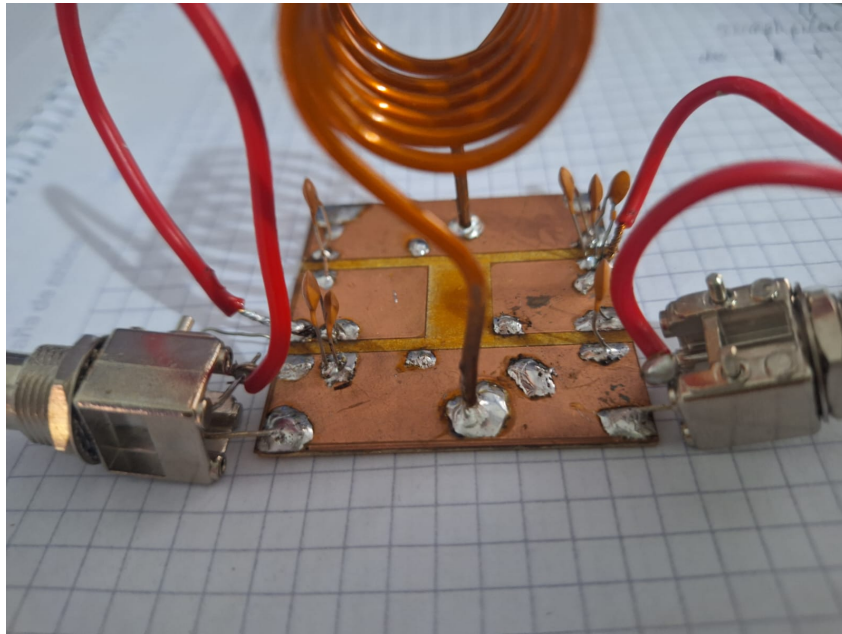


Figura 10: PCB montada

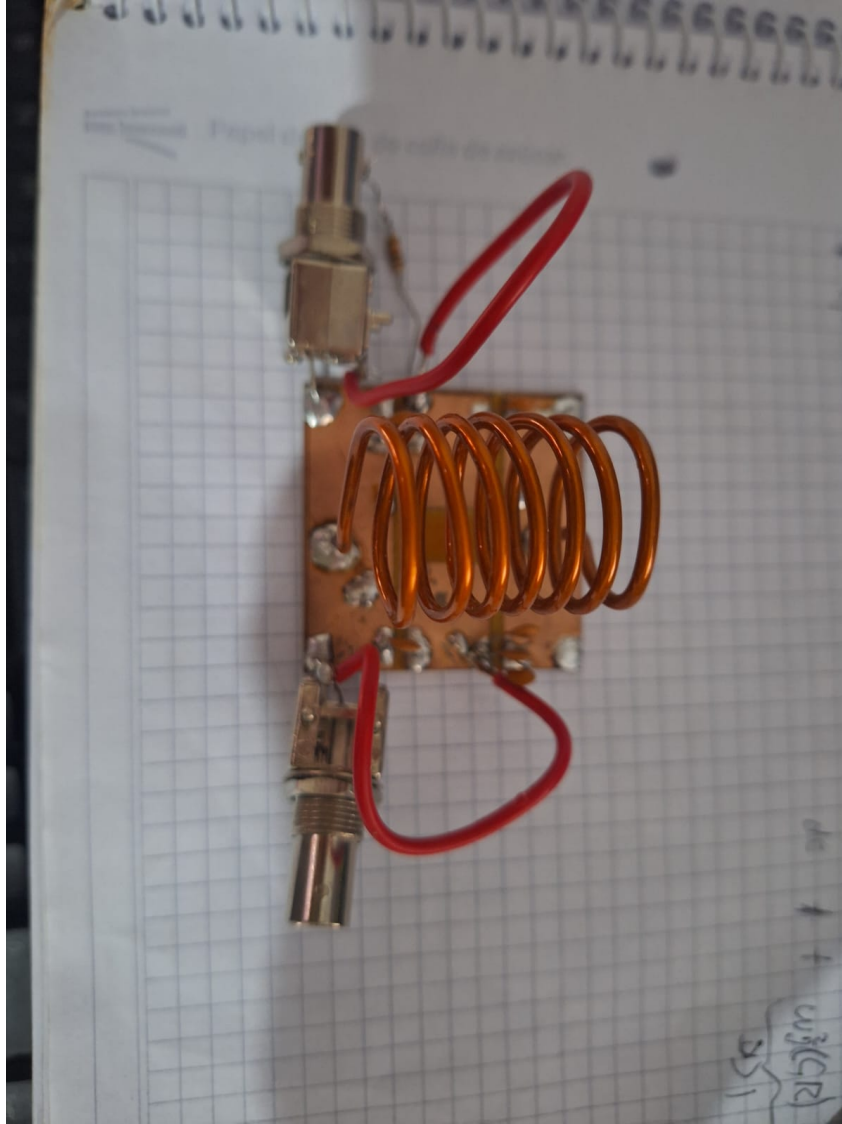


Figura 11: PCB montada

3.5. Mediciones

3.5.1. 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 utilizó una resistencia de $1\text{ k}\Omega$. Una vez realizada la conexión, se varía la frecuencia del generador de señales de menor a mayor hasta encontrar la frecuencia de resonancia. Debemos considerar que el osciloscopio tiene una capacidad de entrada, por lo tanto, esta capacidad parásita puede afectar la medición de la frecuencia de resonancia.

La medicion f_{o1} :

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

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

La medicion f_{o2} :

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

Para obtener la frecuencia de resonancia f_o se debe obtener C_o apartir de estas ecuaciones:

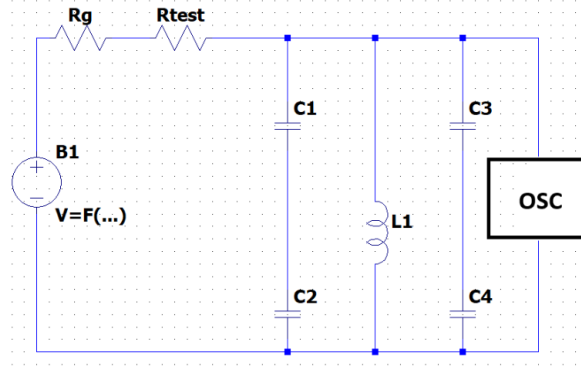


Figura 12: Medicion de f_o

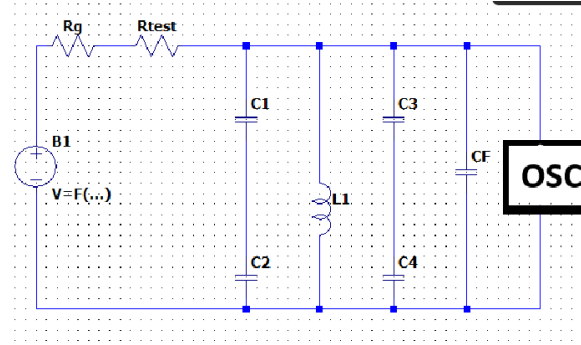


Figura 13: Medicion de f_{o2}

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

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

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, nos damos cuenta de que la capacidad agregada del osciloscopio, cables BNC, soldaduras, etc., es comparable a la del circuito, por lo tanto, modificará la medición y afectará el resultado. Ahora determinaremos el valor de la inductancia L :

$$L = \frac{1}{(2\pi f_{o1})^2} \cdot \frac{1}{C_T + C_o} = 0,538 \mu H \quad (51)$$

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

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C_T}} = 16,3MHz \quad (52)$$

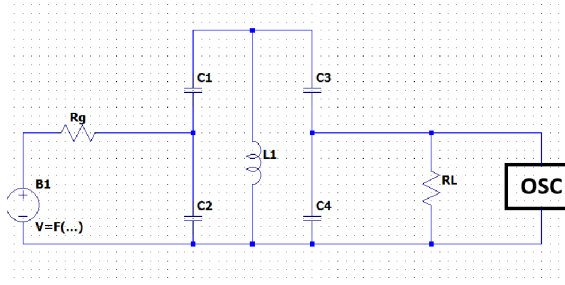


Figura 14: Medicion de BW

3.5.2. 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, una vez encontrado el pico maximo, buscaremos -3 dB de la amplitud maxima. La diferencia entre la frecuencia de corte superior y la inferior nos dara el ancho de banda. 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:

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

3.5.3. Medicion de R_p

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

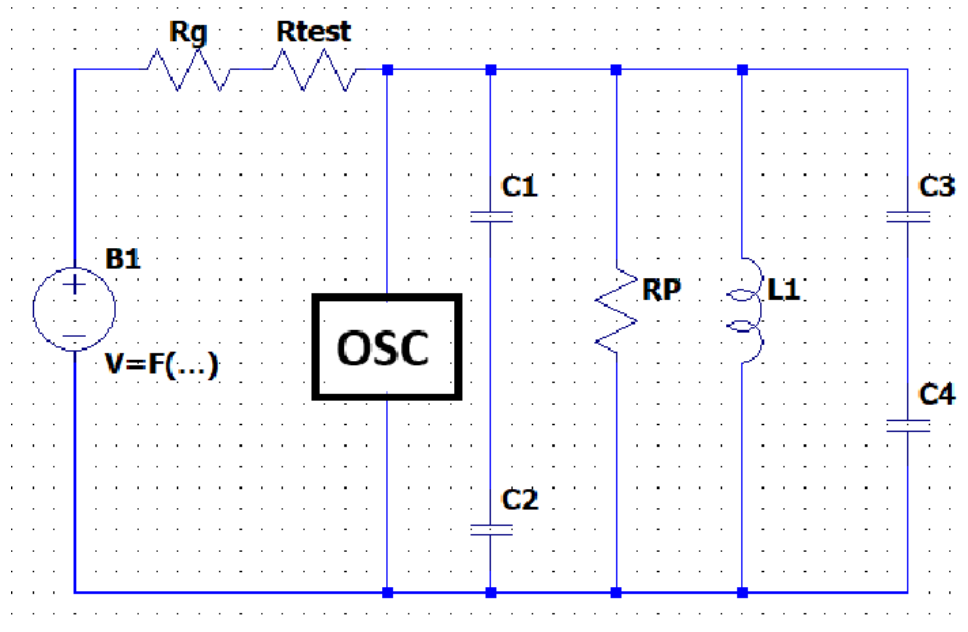


Figura 15: Medicion de R_p

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:

- $V_{osciloscopio} = 2V$
- $V_{B1} = 1,76V$
- $R_p = 7,3k\Omega$

3.5.4. Medicion de Z_{in}

Para la medicion de la impedancia de entrada, se utiliza el esquema de la figura 16 y la 17

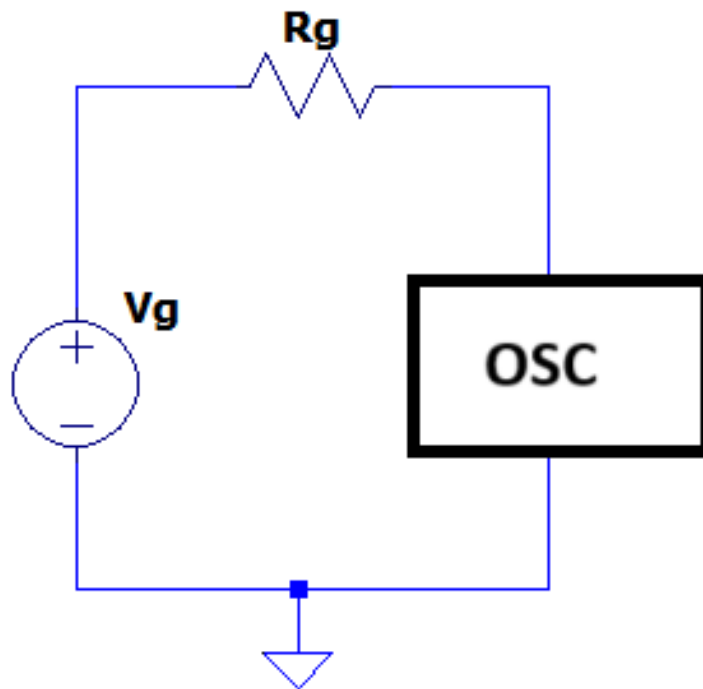


Figura 16: Medicion de V_g

3.5.5. Medicion de Z_{out}

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

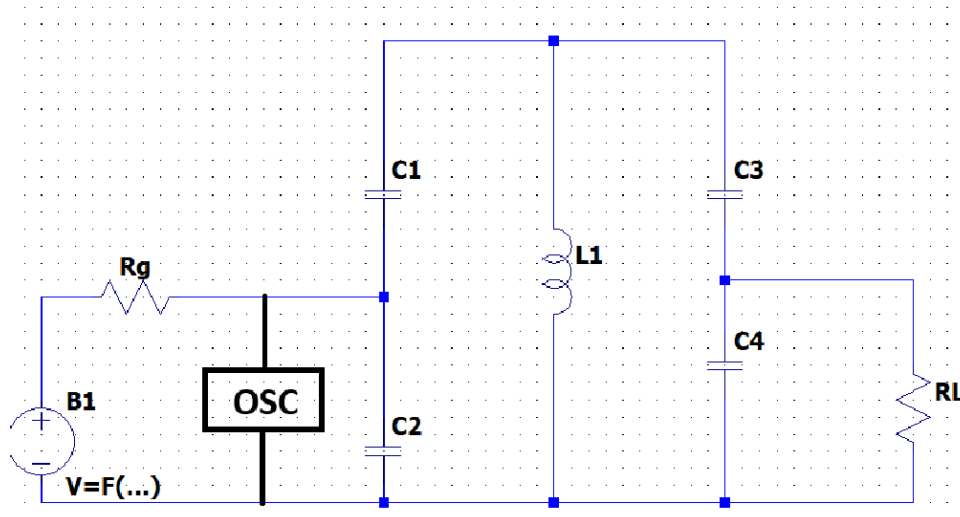


Figura 17: Medicion de Z_{in}

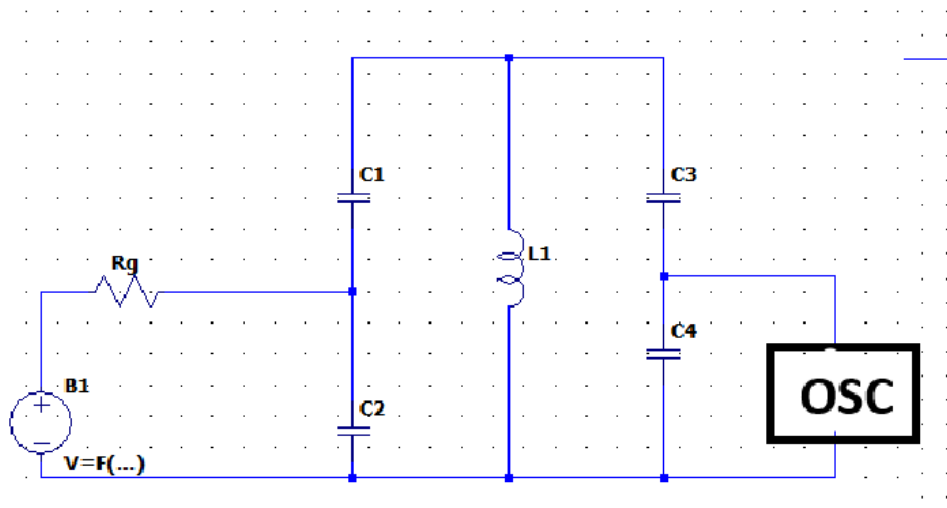


Figura 18: Medicion de Z_{out}

4. 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.

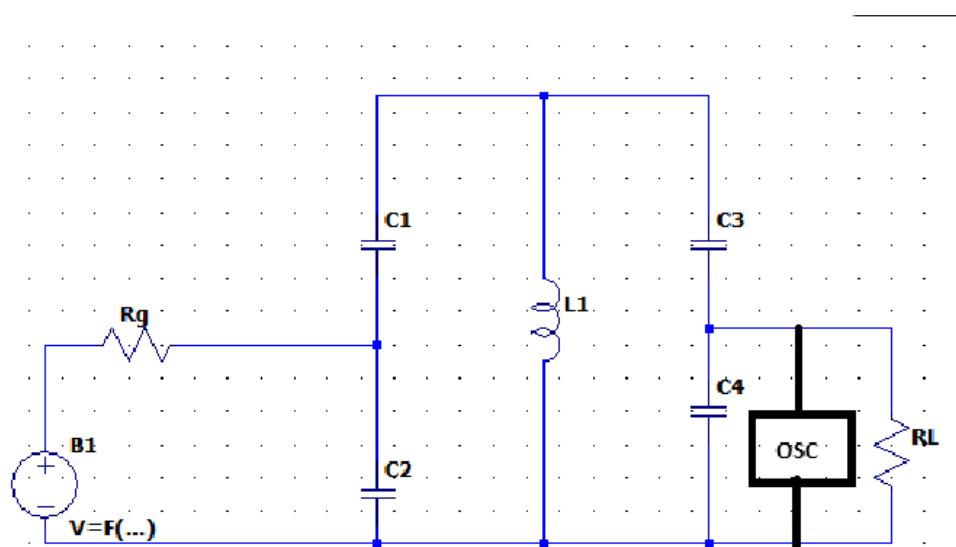


Figura 19: Medicion de Z_{out}