



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
25 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. Selecccion de componentes y armado	12
4. Mediciones	13
4.1. Medicion de f_o	13

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

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.

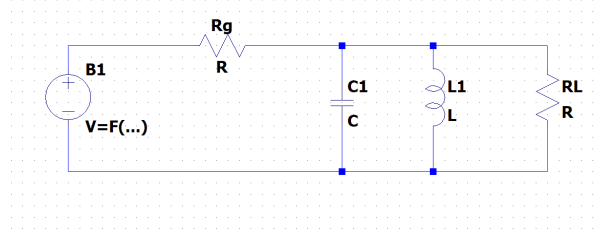


Figura 1: Circuito resonante LC

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).

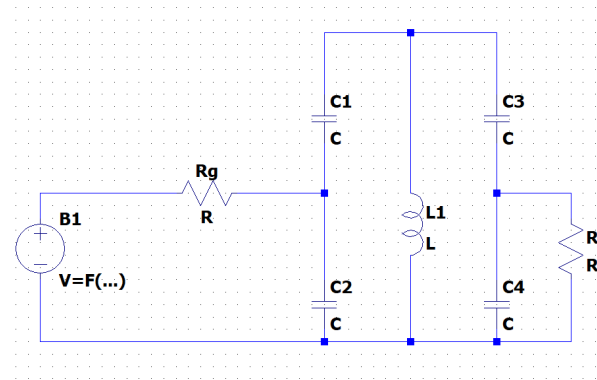


Figura 2: Circuito de acoplamiento interetapas LC modificado

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:

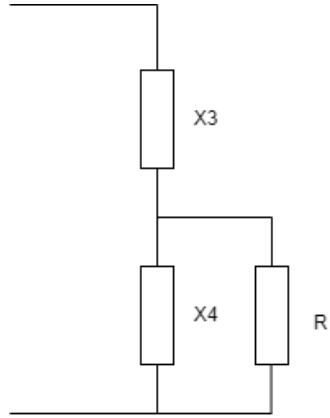


Figura 3: Auto transformador

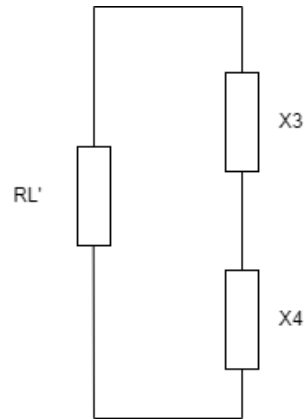


Figura 4: Esquema de relación de transformación

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:

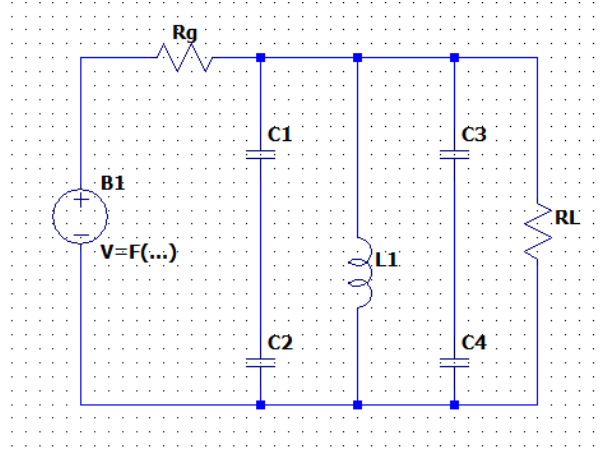


Figura 5: Circuito reflejado

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:

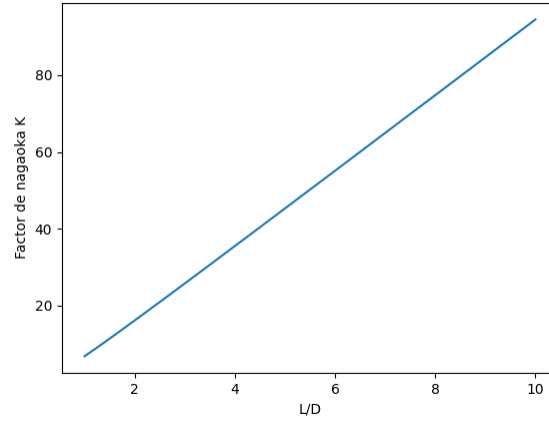


Figura 6: Curva de Nagaoka K

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:

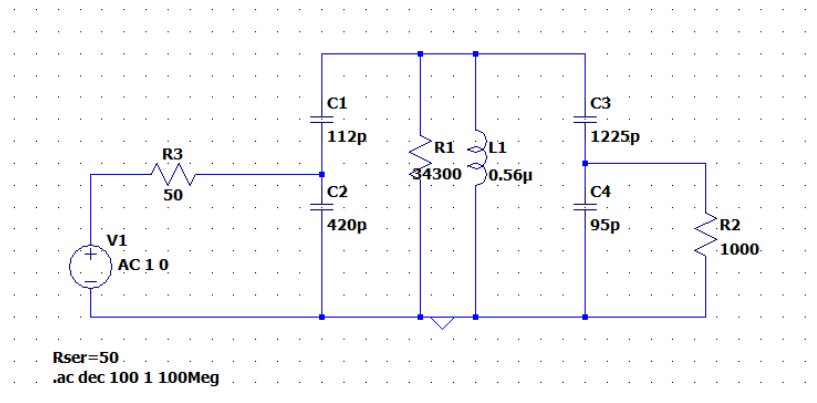


Figura 7: Circuito simulado en LTSpice

El resultado de la simulacion es el siguiente:

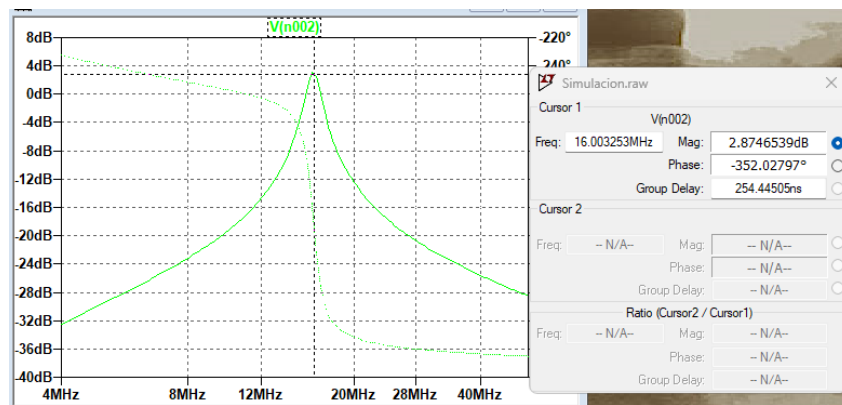


Figura 8: Respuesta en frecuencia del circuito simulado

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:

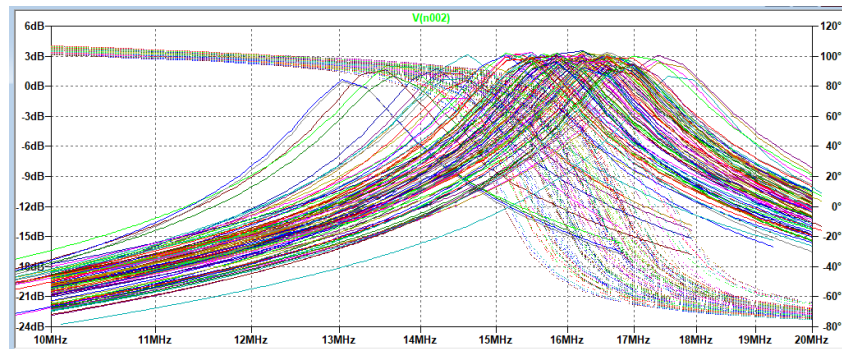


Figura 9: Analisis de montecarlo

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

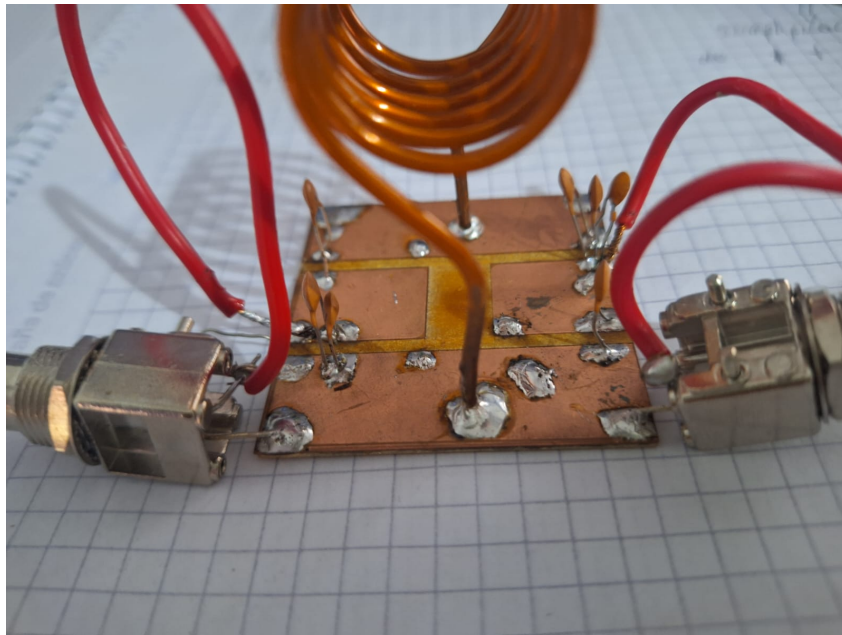


Figura 10: PCB montada

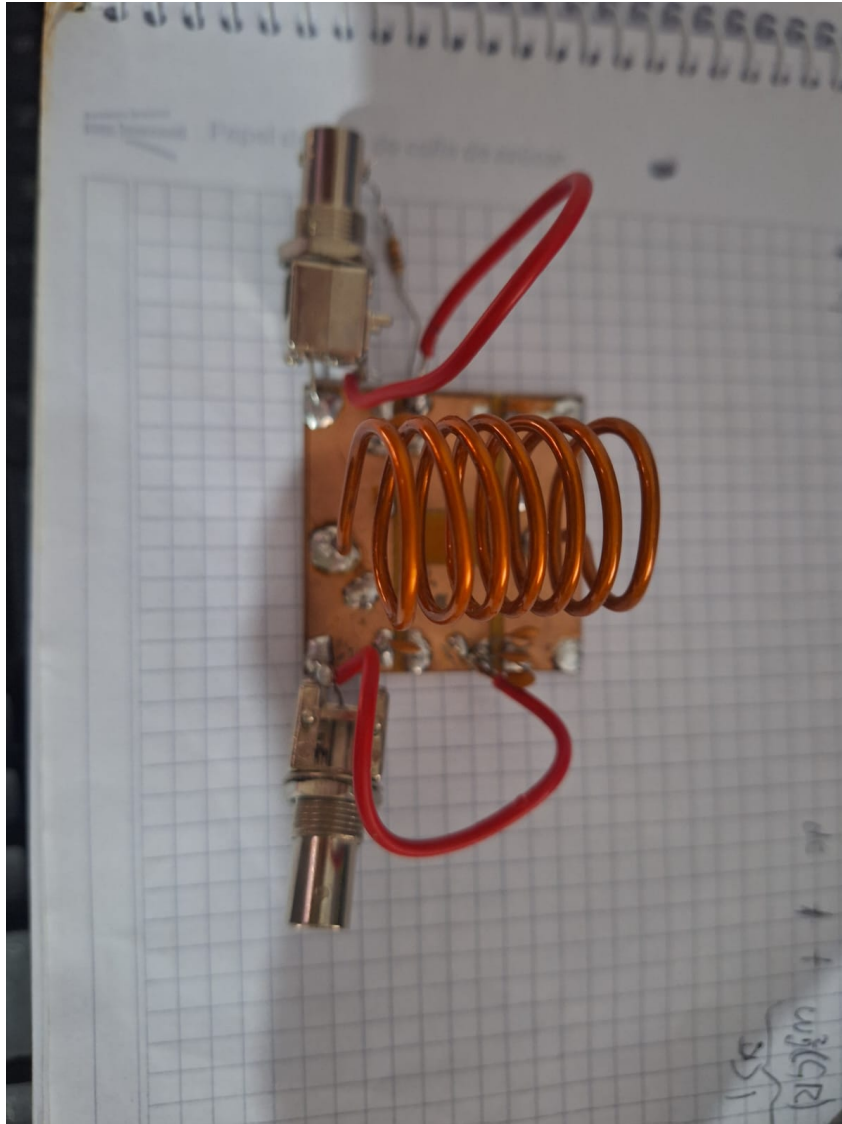


Figura 11: PCB montada

4. Mediciones

4.1. Medicion de f_o