



Universidad Nacional de Córdoba

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Electrónica Analógica III

Trabajo Práctico N° 1 - Circuitos sintonizados

Nombre	DNI
Corvalán, Abel Nicolás	41.220.050

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

Córdoba, República Argentina
30 de junio de 2024

Índice

1. Introducción	4
2. Marco Teórico	4
3. Diseño del circuito	6
3.1. Producto LC	6
3.2. Diseño del inductor	6
3.3. Cálculo de resistencia de pérdidas R_p	7
3.4. Cálculo de resistencia total R_t	7
3.5. Cálculo de capacitores de red de acoplamiento	7
3.6. Simulaciones	8
4. Montaje	9
5. Mediciones	9
5.1. Medición de resistencia de pérdidas	10
5.2. Medición de la inductancia L , frecuencia de resonancia f_o y factor de calidad descargado Q_d	10
5.3. Medición de impedancia de entrada Z_{in}	11
5.4. Impedancia de salida Z_{out}	12
5.5. Ancho de banda	13
5.6. Resultados finales	14
6. Instrumentos	14
7. Conclusión	15
8. Link de Repositorio	15

Índice de figuras

1.	Circuito tanque LC	4
2.	Circuito LC resonante con carga	4
3.	Circuito LC resonante con carga	5
4.	Circuito LC resonante con carga	5
5.	Simulación del circuito tanque ideal	8
6.	Gráfico de bode circuito ideal	9
7.	Circuito con reflexión de impedancias	9
8.	Circuito para medición de resistencia R_p	10
9.	Circuito para medición de L , f_o y Q_d	10
10.	Circuito para medición de impedancia Z_{in}	11
11.	Medición para Z_{in} con circuito desconectado	11
12.	Medición para Z_{in} con circuito conectado	12
13.	Circuito para medición de Z_{out}	12
14.	Medición para Z_{out} sin carga	13
15.	Medición para Z_{out} con carga	13
16.	Circuito para medición de BW	14

Índice de tablas

1.	Valores obtenidos	14
----	-----------------------------	----

1. Introducción

En el siguiente informe se detalla el desarrollo de un circuito sintonizado para una frecuencia de $20MHz$. Las especificaciones del circuito a desarrollar son las siguientes:

- $f_o = 20MHz$
- $Z_g = 20\Omega$
- $Z_L = 1k\Omega$
- $Q_C = 10\Omega$

2. Marco Teórico

Un circuito sintonizado LC o circuito tanque, es un circuito eléctrico resonante que consiste en un inductor L y un capacitor C . El circuito se muestra en la siguiente figura 1.

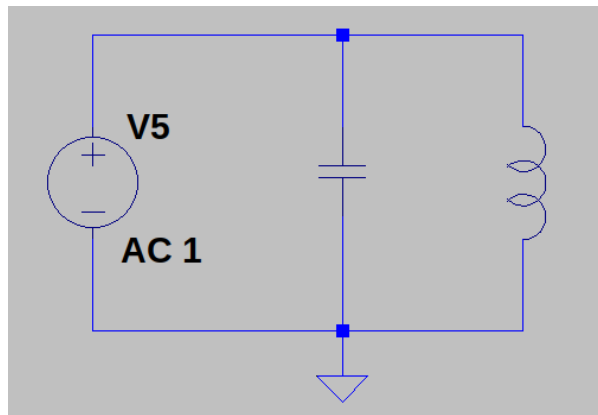


Figura 1: Circuito tanque LC

Este circuito almacena energía en forma de campo electromagnético a una frecuencia de resonancia. El oscilador tanque LC es usado para producir señales a cierta frecuencia o seleccionar una señal a una frecuencia particular proveniente de otra señal más compleja (con mayor cantidad de componentes de frecuencias). La frecuencia de resonancia del circuito se determina por fórmula (1):

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

Es una etapa importante en varios dispositivos electrónicos, particularmente en equipos de radio, circuitos osciladores, filtros, sintonizadores y mezcladores de frecuencia.

El inductor, al no ser un elemento ideal, tiene una componente de pérdidas la cual se modela con una resistencia en paralelo, la cual denominaremos R_p .

Se realiza un estudio del circuito excitado con una señal y con una carga. Se muestra en la figura 2:

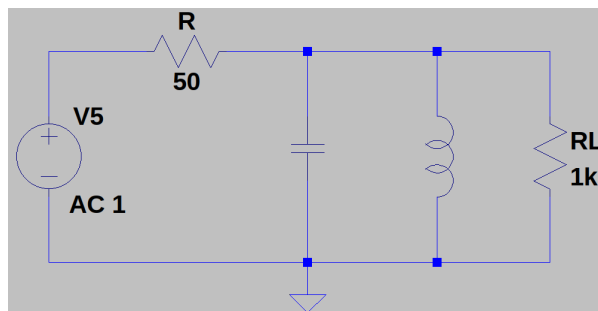


Figura 2: Circuito LC resonante con carga

Este circuito puede conectarse de otra forma la cual mantiene la frecuencia de trabajo f_o . Este circuito se muestra en la figura 4.

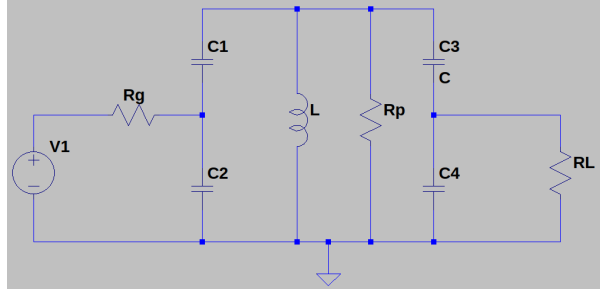


Figura 3: Circuito LC resonante con carga

Para realizar esta topología en base al circuito tanque anterior (figura 2) , se desarrollan etapas de reflexión de impedancia.

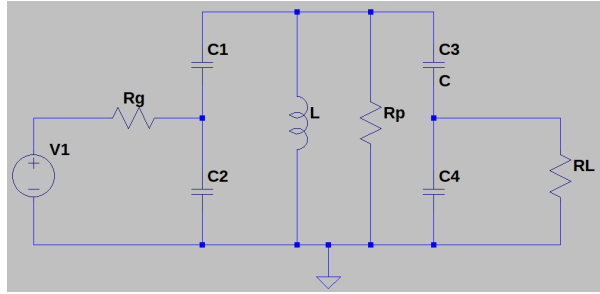


Figura 4: Circuito LC resonante con carga

Se realiza el cálculo de la impedancia Z_{eq} .

$$Z_{eq} = X_{C_A} + \left(X_{C_B} // R \right) = X_{C_A} + \frac{X_{C_B} R}{X_{C_B} + R} =$$

$$Z_{eq} = \frac{X_{C_A} X_{C_B} + X_{C_A} R + X_{C_B} R}{X_{C_B} + R}$$

$$Z_{eq} = \frac{R \left(1 + \frac{X_{C_B}}{X_{C_A}} - j \frac{1}{\omega C_A} \right)}{1 + j \omega R C_B} = \frac{R \left(1 + \frac{C_B}{C_A} - j \frac{1}{\omega C_A} \right)}{1 + j \omega R C_B}$$

Por lo que la impedancia equivalente Z_{eq} queda determinada por la ecuación 2

$$\boxed{Z_{eq} = \frac{R \left(1 + \frac{C_B}{C_A} - j \frac{1}{\omega C_A} \right)}{1 + j \omega R C_B}} \quad (2)$$

Para simplificar los cálculos, se plantea la Z_{eq} en términos de admitancias.

$$Y_{eq} = \frac{1 + j \omega R C_B}{R \left(1 + \frac{C_B}{C_A} \right) - j \frac{1}{\omega C_A}}$$

Luego se obtiene

$$R_{eq} = R^2 \left(1 + \frac{C_A}{C_B} \right)^2 \quad (3)$$

Por otro lado se presenta el concepto de factor de calidad (Q) del inductor. Las fórmulas para este factor son los siguientes:

$$Q_d = \frac{R_p}{X_L}$$

$$Q_c = \frac{f_o}{BW} = \frac{R_T}{X_L}$$

Donde se tiene que Q_d es el estudio del inductor en condición en la que este no se encuentra conectado a ninguna carga mas que su propia resistencia interna. Este factor Q_d se determina por las características intrínsecas del componente (inductancia y resistencia interna).

El factor de calidad Q_c (cargado) es cuando se tiene la condición de carga externa conectada. Se tiene una resistencia total la cual se compone de la resistencia interna del inductor y la resistencia de la carga externa.

3. Diseño del circuito

3.1. Producto LC

En primer instancia se define el producto LC a partir del valor de frecuencia que se tiene por requerimiento.

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$LC = \frac{1}{(2\pi f_o)^2} \quad (4)$$

$$LC = \frac{1}{(2\pi 20MHz)^2} = 63,32 \cdot 10^{-18}$$

$$\boxed{LC = 63,32 \cdot 10^{-18}} \quad (5)$$

3.2. Diseño del inductor

Se realiza el diseño del inductor en base a la ecuación 6.

$$\boxed{L = \frac{N^2 \mu A}{l}} \quad (6)$$

Donde:

- L : inductancia medida en henrios (Hy).
- N : cantidad de espiras del inductor.
- μ : permeabilidad del núcleo, en este caso aire en ($\frac{Hy}{m}$).
- A : área de la sección transversal del inductor en metros cuadrados (m^2).
- l : longitud en metros (m).

Se tabula en una tabla de LibreOffice Calc los distintos valores de inductancias que se pueden obtener en función de parámetros constructivos disponibles, tales como el diámetro del núcleo d , el largo del inductor l , el diámetro del conductor d_0 .

A partir del valor del producto LC de la expresión 5, se establece un valor de inductancia con magnitudes constructivas realizables. Luego se obtiene el valor total del capacitor del circuito.

Se tiene que el valor de la inductancia es $L = 918nHy$.

$$C = \frac{LC}{L} = \frac{63,32 \cdot 10^{-18}}{918nHy} = 68,9pF \approx 69pF$$

$$\boxed{C = 69pF}$$

3.3. Cálculo de resistencia de pérdidas R_p

Para el cálculo de la resistencia de pérdidas R_p primero se calcula Q_d (descargado). Esto se hace con la siguiente fórmula:

$$Q_d = 8550 \frac{Dl}{102l + 45D} \sqrt{f}$$

Donde se tiene que:

- Frecuencia en $f[MHz]$.
- Diámetro del inductor $D[cm]$.
- Largo del inductor $l[cm]$

$$Q_d = 8550 \frac{3,08cm \ 5cm}{102 \ 5cm + 45 \ 3,08cm} = 907,87$$

$$Q_d = 907,87$$

Ahora se procede a calcular el valor de la resistencia de pérdidas de nuestro inductor R_p . Se parte de la siguiente ecuación.

$$Q_d = \frac{R_p}{\omega L}$$

$$R_p = \omega L Q_d = 2\pi 20MHz \ 918nHy \ 907,87$$

$$R_p = 104679K\Omega$$

3.4. Cálculo de resistencia total R_t

Para el cálculo de la resistencia total del sistema se parte de la siguiente ecuación.

$$Q_c = \frac{R_t}{X_L}$$

$$R_t = \omega L Q_c = 2\pi L \ 10 = 1153\Omega$$

$$R_t = 1153\Omega$$

3.5. Cálculo de capacitores de red de acoplamiento

Se calculó anteriormente la capacidad total C_T del circuito. Ahora debemos adoptar valores de capacitores para la red de acoplamiento en la entrada y salida de nuestro circuito.

El oscilador debe adaptarse a la impedancia del generador $R_g = 50\Omega$, mientras que en la salida debe hacerlo a una resistencia de carga $R_L = 1k\Omega$.

El circuito debe conservar su resistencia total R_t . Por lo que se plantea las siguientes condiciones para mantener el valor y lograr la adaptación de impedancias.

$$R'_g = 2R_t$$

$$(R_p // R'_L) = 2R_t$$

Se resuelve el sistema de ecuaciones desarrollado anteriormente.

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

Para la resolución del sistema de ecuaciones se implementó un script de Python. Se despeja el valor de R'_L .

$$R'_L = \frac{2R_T R_p}{R_p - 2R_T}$$

$$R'_L = 2358\Omega$$

Se obtiene los siguientes valores de los capacitores:

$C_1 = 40,47pF$, valor comercial $C_1 = 43pF$

$C_2 = 234,35pF$, valor comercial $C_2 = 230pF$

$C_3 = 52,98pF$, valor comercial $C_3 = 53pF$

$C_4 = 98,94pF$, valor comercial $C_4 = 100pF$

3.6. Simulaciones

Se realiza la simulación del circuito tanque ideal. Se muestra el mismo en la figura 5.

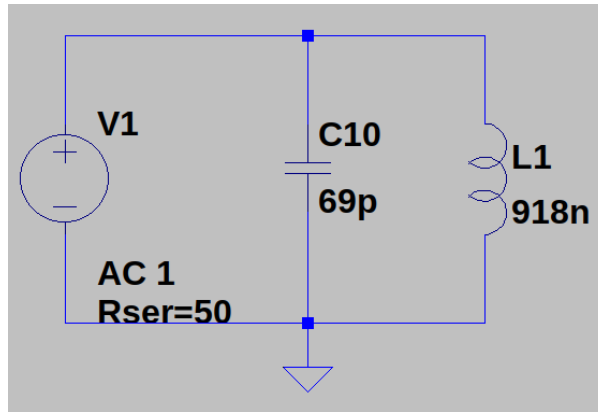


Figura 5: Simulación del circuito tanque ideal

Se obtiene la respuesta en frecuencia del mismo en la figura 6.

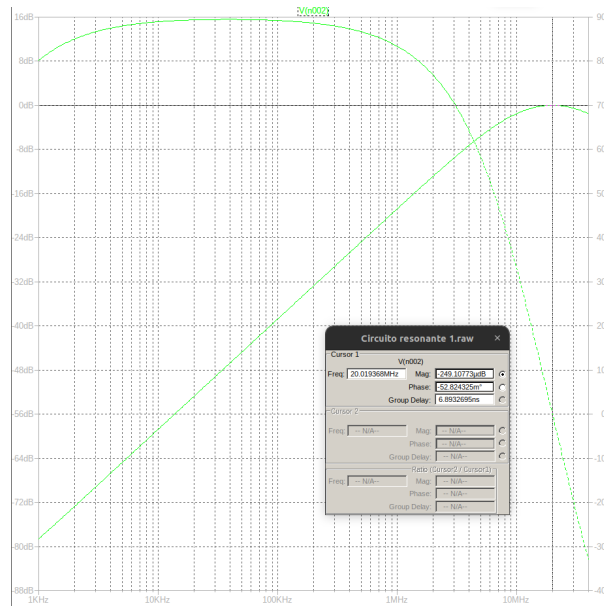


Figura 6: Gráfico de bode circuito ideal

Se muestra en la figura 7 el circuito en topología de divisor de tensión con capacitores.

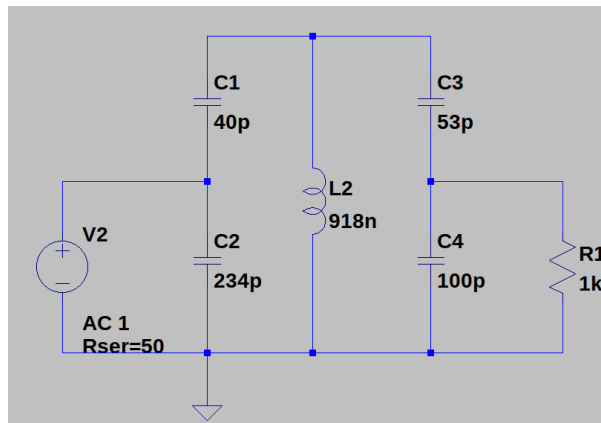


Figura 7: Circuito con reflexión de impedancias

4. Montaje

Los componentes que se utilizan para el montaje del circuito son los siguientes:

- Cable de cobre de $d_0 = 1,8mm$.
- Capacitores de $43pF$, $230pF$, $53pF$, $100pF$.
- Conectores BNC.
- Placa de PCB de $(5 \times 5)cm$.

5. Mediciones

Se realizan las mediciones del circuito las siguientes mediciones del circuito:

- Medición de resistencia de pérdidas.
- Medición de la inductancia L , frecuencia de resonancia f_o y factor de calidad Q_d .
- Medición de impedancia de entrada Z_{in} y Z_{out} .
- Medición de ancho de banda.

5.1. Medición de resistencia de pérdidas

Para la medición de la resistencia de pérdidas se realiza el siguiente circuito:

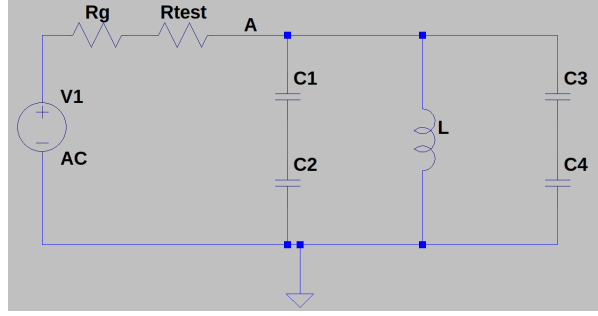


Figura 8: Circuito para medición de resistencia R_p

Se implementa una resistencia $R_{test} = 100K\Omega$. De esta forma se tiene un divisor de tensión conformado por la resistencia R_p y el circuito tanque el cual se encuentra afectado por la capacidad parásita del osciloscopio. Se realiza un barrido en frecuencia y se obtiene la resonancia del circuito. Se obtienen las siguientes mediciones:

$$R_p = V_{out} \frac{(R_g + R_{test})}{V_{in} - V_{out}}$$

$$R_p = 3,88V \frac{50\Omega + 100K\Omega}{3,88V - 1,02V} = 135K\Omega$$

5.2. Medición de la inductancia L , frecuencia de resonancia f_o y factor de calidad descargado Q_d

Se realiza la siguiente conexión para el circuito a medir.

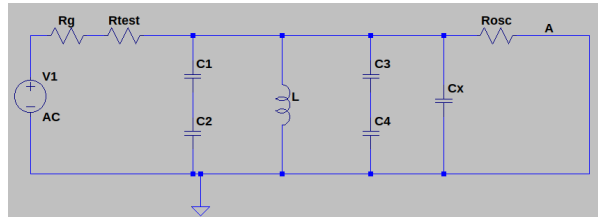


Figura 9: Circuito para medición de L , f_o y Q_d

Se realiza la medición con el divisor de tensión conformado por la resistencia R_p y el circuito tanque el cual se encuentra afectado por la capacidad parásita del osciloscopio.

Se realiza un barrido de frecuencia y se tiene la siguiente frecuencia f'_o

$$f'_o = 10,8MHz$$

- Medición 2.

Se coloca un capacitor $C_x = 22pF$ y se mide la frecuencia f''_o

$$f''_o = 10,2MHz$$

Se tiene un sistema de dos ecuaciones con lo que se obtienen los valores de L y C_o (capacidad parásita del oscilador)

$$\begin{cases} f'_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C+C_o)}} \\ f''_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C+C_o+C_x)}} \end{cases}$$

Se obtienen los siguientes valores:

$$L = 1195nHy$$

$$C_o = 112,64pF$$

Donde el valor de C_o representa la capacidad parásita del oscilador.

Se calcula la frecuencia de resonancia real f_o del circuito tanque reemplazando el valor de $L = 1195nHy$ obtenido anteriormente.

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{1195nHy 69pF}} = 17,52MHz$$

$$f_o = 17,52MHz$$

5.3. Medición de impedancia de entrada Z_{in}

Se conecta el generador a la entrada del circuito (nodo A).

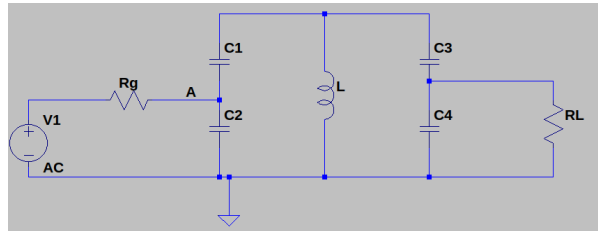


Figura 10: Circuito para medición de impedancia Z_{in}

El circuito medido debe presentar una impedancia $Z_{in} = 50\Omega$, por lo que en el osciloscopio debemos obtener una tensión pico máxima de $V_{gpp}/2$.

$$V_{pp\text{teorica}} = \frac{V_{gpp}}{2} = \frac{2V}{2} = 1V$$

A continuación se muestra la medición realizada con el osciloscopio.

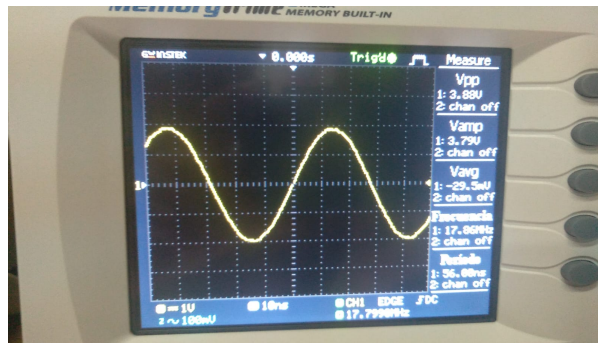


Figura 11: Medición para Z_{in} con circuito desconectado

En la medición se tiene:

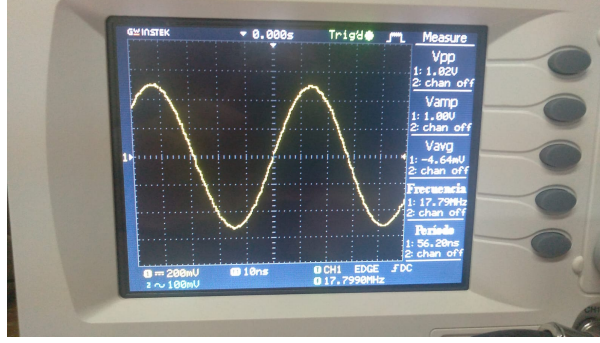


Figura 12: Medición para Z_{in} con circuito conectado

$$V_{sincarga pp} = 3,88V$$

$$V_{con carga pp} = 1,02V$$

La frecuencia a la que ocurre la resonancia es $f_o = 17,8MHz$. La impedancia de entrada Z_{in} se calcula de la siguiente forma:

$$Z_{in} = \frac{R_g}{\frac{V_d}{V_c} - 1}$$

$$Z_{in} = \frac{50\Omega}{\left(\frac{3,88V}{1,02V} - 1\right)} = 17,83\Omega$$

$$Z_{in} = 17,83\Omega$$

5.4. Impedancia de salida Z_{out}

Para la medición de la impedancia de salida Z_{out} se realiza la siguiente conexión.

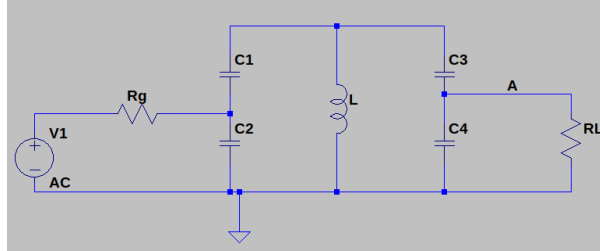


Figura 13: Circuito para medición de Z_{out}

En primera instancia se establece la resonancia del circuito y se mide la salida sin carga. Luego al conectar la carga se mide la tensión con el osciloscopio para calcular la impedancia Z_o .

A continuación se muestra la medición realizada con el osciloscopio.

Se obtienen los siguientes resultados:

$$V_{sin carga pp} = 6V$$

$$V_{con carga pp} = 2,92V$$

Se procede a calcular la impedancia de salida Z_o :

$$Z_o = R_L \left(\frac{V_d}{V_c} - 1 \right)$$

$$Z_o = 1k\Omega \left(\frac{6V}{2,92V} - 1 \right) = 1054\Omega$$

$$Z_o = 1054\Omega$$

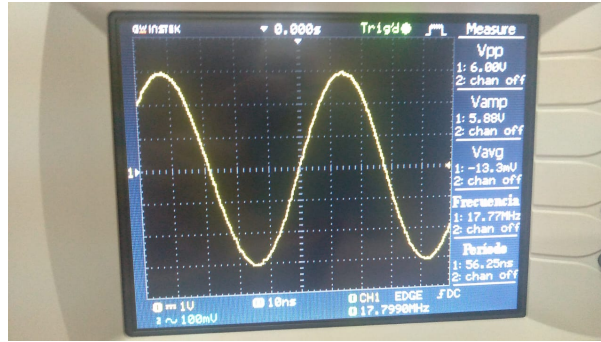


Figura 14: Medición para Z_{out} sin carga

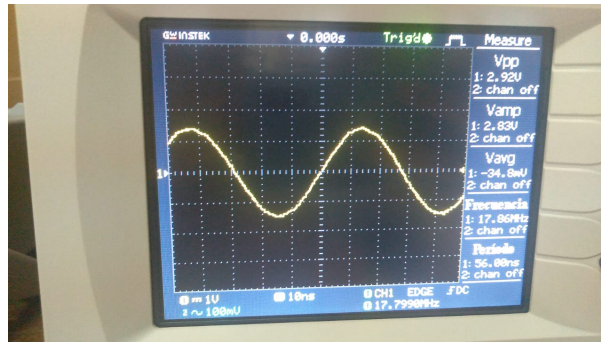


Figura 15: Medición para Z_{out} con carga

5.5. Ancho de banda

Para medir el ancho de banda se realiza la siguiente conexión para el circuito.

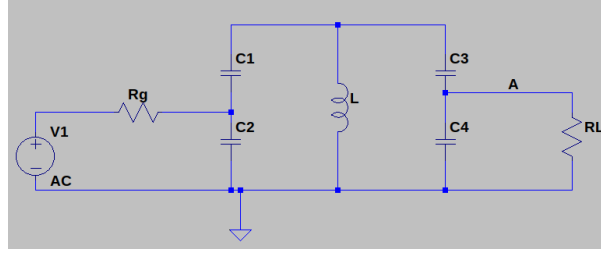


Figura 16: Circuito para medición de BW

La conexión del osciloscopio se realiza en el nodo A. Se mide el ancho de banda del circuito en base a la amplitud de la frecuencia de resonancia del mismo ($f_o = 17,8MHz$). Se obtiene las siguientes mediciones:

En $f_o = 17,8MHz$ se tiene $V_{max} = 2,72V$.

Se calcula el valor de tensión que presenta una caída de $-3dB$. Esto es:

$$V_{-3dB} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{2,72V}{\sqrt{2}} = 1,923V$$

$$V_{-3dB} = 1,923V$$

Se realiza un barrido de frecuencias y se obtiene que la amplitud de la salida cae $-3dB$ en los siguientes valores de refrecuencia:

$$f_{high} = 18,21MHz \quad f_{low} = 17,48MHz$$

Se procede a calcular el ancho de banda:

$$BW = f_{high} - f_{low} = 18,21MHz - 17,48MHz = 730KHz$$

$$BW = 730KHz$$

Calculando el $Q_{cargado}$, se tiene lo siguiente:

$$Q_c = \frac{f_o}{BW} = \frac{17,8MHz}{730KHz} = 24,38$$

$$Q_c = 24,38$$

Se tiene una variación del 143 % respecto del valor de diseño $Q_c = 10$.

5.6. Resultados finales

A continuación se detallan los valores de las mediciones en una tabla.

	L	R_p	f_o	Z_{in}	Z_{out}	BW	Q_c	Q_d
Valor calculado	918nHy	104K Ω	20MHz	50 Ω	1K Ω	2MHz	10	907.87nHy
Valor medido	1192nHy	135K Ω	17.8MHz	17.83 Ω	1054 Ω	730KHz	24.38	1192nHy
Variación	29 %	29.8 %	11 %	64.34 %	1 %	63 %	144 %	31 %

Tabla 1: Valores obtenidos

6. Instrumentos

Los instrumentos implementados para la medición son:

- Generador de funciones GW Instek AFG-2125.
- Osciloscopio digital GW Instek GDS-1102A-U.

7. Conclusión

Se realizó el circuito propuesto, con el diseño del inductor en base a parámetros de construcción disponibles tales como el diámetro del conductor, diámetro del núcleo. Se obtuvo un valor considerablemente alto en la inductancia con respecto al calculado ($L_{obtenido} = 1192nHy$ mientras que el valor de inductancia de diseño era $L_{calculado} = 918nHy$). Esto se debe a que en la construcción del inductor no se obtiene precisión tal en la magnitud del diámetro del núcleo del componente, además de la dispersión en los valores de los capacitores implementados. Al realizar las mediciones no se puede medir en forma directa la inductancia L y la frecuencia de resonancia del circuito f_o ya que el osciloscopio tiene una capacitancia parásita $C_{parasita} = 20pF$ (se detalla en el conector del dispositivo). Se tiene que el valor de Q_c es el factor que tiene mayor variación esto se debe a que hay un aumento en la R_t del sistema. Por otro lado, para reducir el valor de $L_{obtenido} = 1192nHy$ se debe alargar el inductor o disminuir el valor de la capacitancia total C_T .

8. Link de Repositorio

Se adjunta un link del repositorio de trabajo el cual contiene hojas de cálculos y scripts de python implementados para la elaboración del trabajo.

Repositorio Github