

# Capítulo 1

## Métodos de medición

## Capítulo 2

### Puente de Wien

# Capítulo 3

## Medición de Inductancias

### 3.1. Introducción

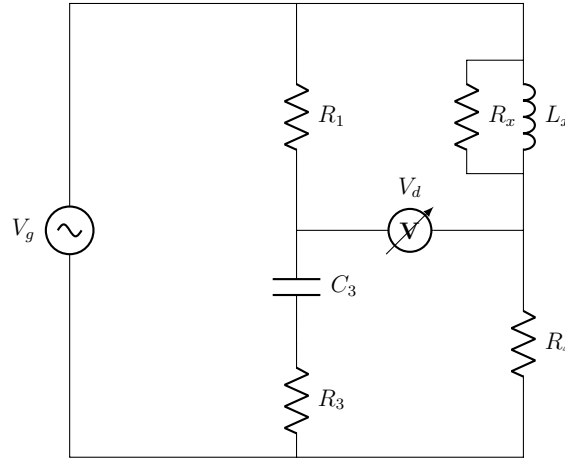


Figura 3.1: Puente de Hay

En principio, dado que la bobina entregada tiene un factor de calidad  $Q_N \approx 53$  a una frecuencia  $f = 10\text{kHz}$ , se decidió utilizar un puente de Hay, como visto en la Figura 3.1, en lugar de un puente de Maxwell, el cual funciona apropiadamente en un rango de  $Q \in (1, 10)$ .

### 3.2. Especificaciones

Se desea que el rango de inductancias medibles sea  $L_x \in [0,4\text{mH}; 2,1\text{mH}]$ . Además, el rango de  $Q$  también debe ser  $Q \in [0,25Q_N; Q_N]$ . Estas características se deben cumplir cuando  $f = 10\text{kHz}$  y  $Q_N$  es el factor de calidad de la bobina patrón.

### 3.3. Diseño

Para la realización del puente, se tuvieron en cuenta las ecuaciones (3.1), (3.2), (3.3) y (3.4).

$$V_d = \frac{(R_3 + \frac{1}{C_3})}{(R_1 + R_3 + \frac{1}{C_3})} - \frac{R_4}{((\frac{1}{R_x} + \frac{1}{sL_x})^{-1} + R_4)} \times V_g \quad (3.1)$$

$$L_x = C_3 R_1 R_4 \quad (3.2)$$

$$Q_x = \frac{1}{2\pi f C_3 R_3} \quad (3.3)$$

$$R_x = \frac{R_1 R_4}{R_3} \quad (3.4)$$

Observando las ecuaciones (3.2) y (3.3), se identificaron 4 grados de libertad, de los cuales  $C_3$  y  $R_4$  se mantienen constantes. Por lo tanto, las variables de ajuste serán  $R_1$  y  $R_3$ , dado que intentar variar  $C_3$  sería demasiado complicado y afecta a ambos  $L_x$  y  $Q_x$  y además, aunque  $R_4$  también parece ser un candidato viable, es preferible mantenerlo constante para que la relación (3.5) se mantenga constante.

$$A = \frac{Z_4}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_1} \quad (3.5)$$

Teniendo en cuenta las variables a ser modificadas y los márgenes de operación descritos en la sección 3.2, se calcularon los valores para cada componente. Con  $C_3 = 1,2\text{nF}$  y  $R_4 = 1,560\text{k}\Omega$ , de las expresiones anteriores se obtiene que

$$R_1 \in \left[ \frac{L_{min}}{C_3 R_4}; \frac{L_{MAX}}{C_3 R_4} \right] = [213,7\Omega; 1,122\text{k}\Omega] \quad (3.6)$$

$$R_3 \in \left[ \frac{1}{2\pi f C_3 Q_{MAX}}; \frac{1}{2\pi f C_3 Q_{min}} \right] = [293,4\Omega; 1,174\text{k}\Omega] \quad (3.7)$$

Dados los rangos obtenidos en las expresiones 3.6 y 3.7, y considerando los componentes disponibles, se eligieron los valores en el cuadro 3.1 para construir el puente y se obtiene el diseño en la Figura 3.2.

Componente	Valor
$R_1$	$[0,2\text{k}\Omega \rightarrow 1,2\text{k}\Omega]$
$R_3$	$[0,2\text{k}\Omega \rightarrow 1,2\text{k}\Omega]$
$R_4$	$1560\Omega$
$C_3$	$1,2\text{nF}$

Cuadro 3.1: Especificaciones elegidas para los componentes

Los resistores variables de menor tamaño fueron puestos con el propósito de reducir la sensibilidad del puente respecto a  $R_1$ . Además, se prefirió elegir las resistencias de tal forma que abarquen un rango levemente mayor al calculado.

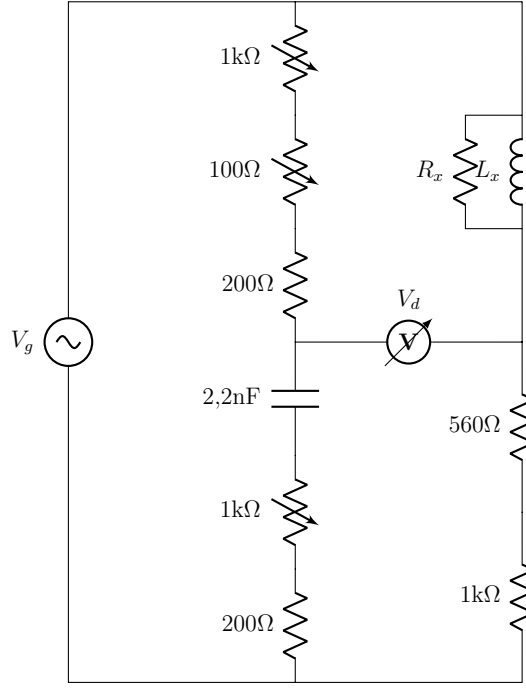


Figura 3.2: Puente diseñado

### 3.4. Simulación y Sensibilidades

En las figuras 3.3 y 3.4 se puede observar el comportamiento de  $V_d$  en función de las resistencias  $R_1$  y  $R_3$  para distintas inductancias de prueba. Es notable que las resistencias afectan de manera dispereja a  $V_d$ .

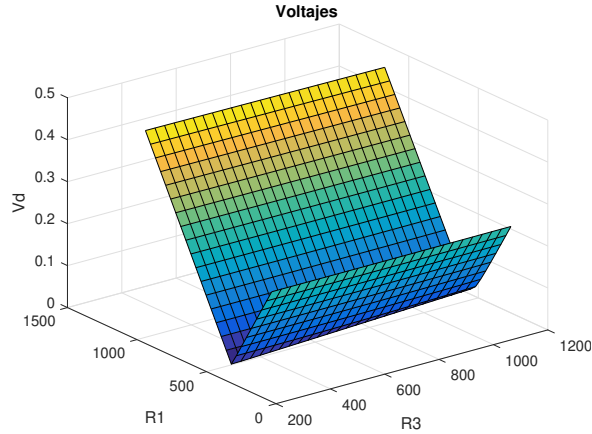


Figura 3.3:  $L_x = 0,9416\text{mH}$ ;  $Q_x = 45,2$ (Componente Patrón)

Además, como se ve en las figuras 3.5, 3.6 y 3.7, aunque los valores de las sensibilidades para los diferentes casos son diferentes, en todo momento se encuentran dentro de aproximadamente el mismo orden de magnitud, debido a los resistores variables de baja amplitud colocados en el diseño. Considerando esto, se puede concluir que  $R_3$  puede ser usada como una resistencia de ajuste fino, mientras que  $R_1$  sería una de ajuste grueso. Por otro lado, se incluyó el preset de  $100\Omega$  para reducir la sensibilidad a  $R_1$ .

Los gráficos de las sensibilidades fueron creados a partir de sus fórmulas analíticas (ecuaciones 3.8 y 3.9).

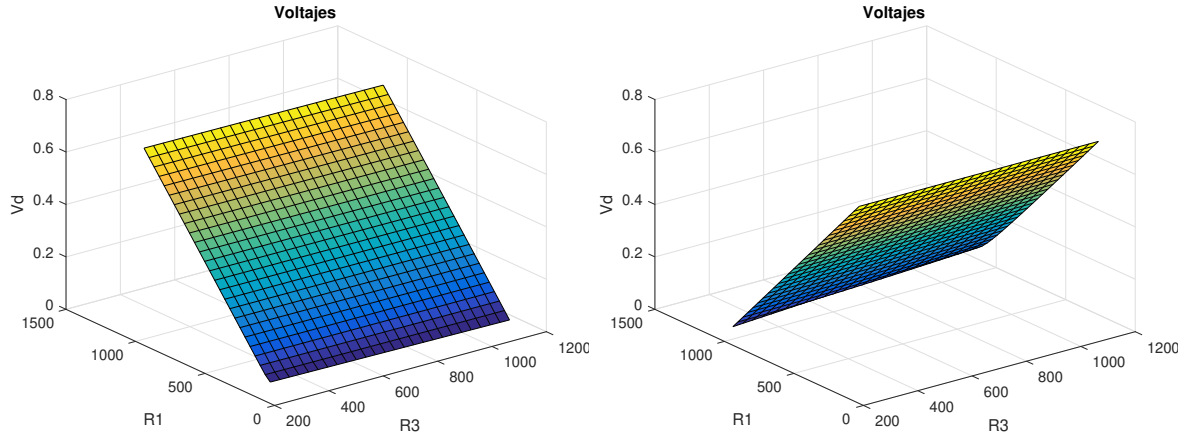


Figura 3.4:  $L_x = 0,4\text{mH}$ ;  $Q_x = 45,2/L_x = 2,1\text{mH}$ ;  $Q_x = 11,3$

$$|\Delta V_d| = \left| \frac{1}{(1 + \frac{Z_1}{Z_3})(\frac{Z_4}{Z_2} + 1)} \cdot \frac{\Delta R_3}{Z_3} \right| \cdot V_g \quad (3.8)$$

$$|\Delta V_d| = \left| \frac{1}{(\frac{Z_3}{Z_1} + 1)(1 + \frac{Z_2}{Z_4})} \cdot \frac{\Delta R_1}{Z_1} \right| \cdot V_g \quad (3.9)$$

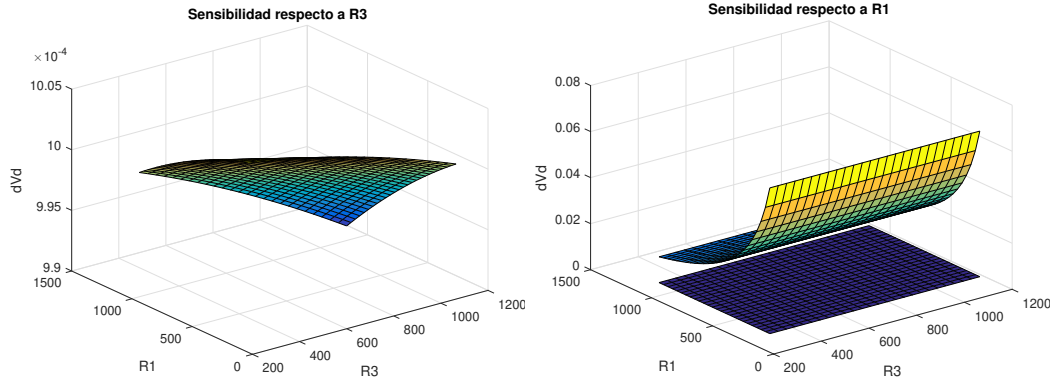


Figura 3.5:  $L_x = 0,9416\text{mH}$ ;  $Q_x = 45,2$ (Componente Patrón)

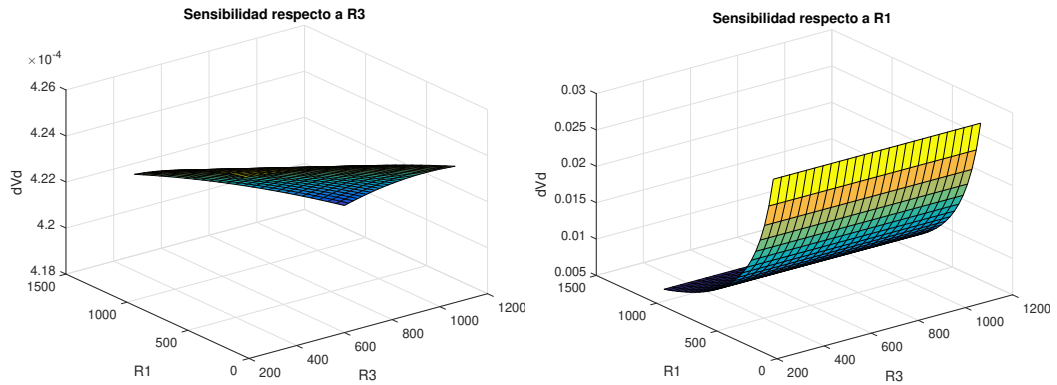


Figura 3.6:  $L_x = 0,4\text{mH}$ ;  $Q_x = 45,2$

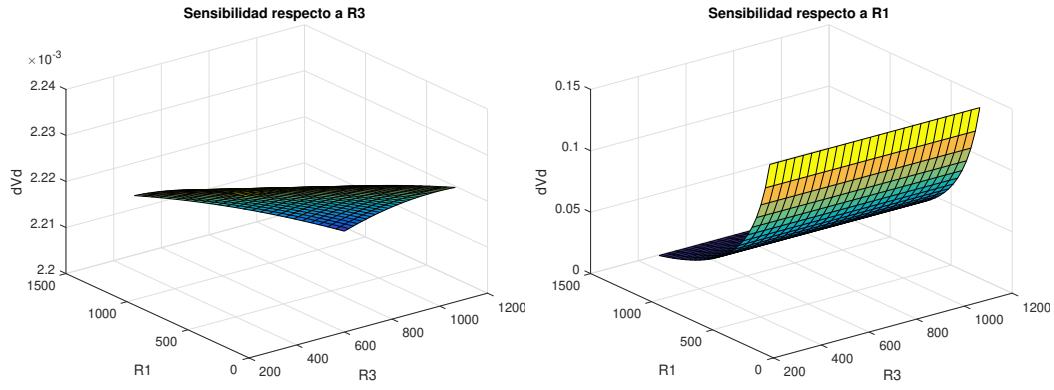


Figura 3.7:  $L_x = 2,1\text{mH}$ ;  $Q_x = 11,3$

### 3.5. Manual de Uso

El puente diseñado permite medir inductancias tales que  $L_x \in [0,4\text{mH}; 2,1\text{mH}]$  y  $Q \in [0,25Q_N; Q_N]$  para  $f = 10\text{kHz}$  donde  $Q_N = 45,2$ .

Instrucciones:

1. Llevar al mínimo todos los presets de  $R_1$  y  $R_3$ .
2. Minimizar  $V_d$  utilizando el preset de  $1\text{k}\Omega$  de  $R_1$ .
3. Minimizar  $V_d$  utilizando el preset de  $100\Omega$  de  $R_1$ .
4. Minimizar  $V_d$  utilizando el preset de  $R_3$ .
5. Minimizar  $V_d$  alternando entre los ajustes finos de  $R_1$  y  $R_3$ .
6. Medir las resistencias finales y calcular  $L_x$ ,  $Q_x$  y  $R_x$ .

Alternativamente a medir las resistencias finales, el uso de los presets puede hacerse contando el número de vueltas dadas al ajuste para tomar los valores de las resistencias finales. Se recomienda el uso de vueltas enteras, ya que con esas diferencias de paso fueron calculadas las sensibilidades.

Especificación	Valor	Especificación	Valor
Rango de $L_x$	$[0,4; 2,1]\text{mH}$	$R_1$	$[1,8; 11,8]\text{k}\Omega$
Rango de $Q_x$	$[13,25; 53]$	$R_3$	$[100; 600]\Omega$
Frecuencia	$10\text{kHz}$	$\Delta R_1$	$4\Omega$
$V_g$	$10\text{V}$	$\Delta R_3$	$20\Omega$
$C_3$	$2,2\text{nF}$	$R_4$	$100\Omega$

Cuadro 3.2: Especificaciones del Puente

### 3.6. Mediciones

Armado el puente en placa experimental, se completó la tabla 3.3:

Se repitieron las mediciones con el analizador de impedancias y se llenó la tabla 3.4

Valor Nominal	$f = 1\text{kHz}$			$f = 10\text{kHz}$			$f = 100\text{kHz}$			Observaciones
	$L$	$Q$	$\phi$	$L$	$Q$	$\phi$	$L$	$Q$	$\phi$	
L Mínima	123	123	123	123	123	123	123	123	123	asdf
L Media	123	123	123	123	123	123	123	123	123	asdf
L Máxima	123	123	123	123	123	123	123	123	123	asdf
L Fuera de Rango	123	123	123	123	123	123	123	123	123	asdf

Cuadro 3.3: Mediciones con el puente

Valor Nominal	$f = 1\text{kHz}$			$f = 10\text{kHz}$			$f = 100\text{kHz}$			Observaciones
	$L$	$Q$	$\phi$	$L$	$Q$	$\phi$	$L$	$Q$	$\phi$	
L Mínima	123	123	123	123	123	123	123	123	123	asdf
L Media	123	123	123	123	123	123	123	123	123	asdf
L Máxima	123	123	123	123	123	123	123	123	123	asdf
L Fuera de Rango	123	123	123	123	123	123	123	123	123	asdf

Cuadro 3.4: Mediciones con el analizador de impedancias

### 3.7. Errores

Se calculó analíticamente el error en las ecuaciones 3.10 y 3.11.

$$\begin{aligned}
\Delta L_x &= \left| \frac{\delta L_x}{\delta R_1} \right| \cdot \Delta R_1 + \left| \frac{\delta L_x}{\delta r_1} \right| \cdot \Delta r_1 \\
&= C_3 R_4 \cdot \Delta R_1 + C_3 R_4 \cdot \Delta r_1 \\
\Rightarrow \frac{\Delta L_x}{L_x} &= \frac{R_1}{R_1 + r_1} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{r_1}{R_1 + r_1} \cdot \frac{\Delta r_1}{r_1}
\end{aligned} \tag{3.10}$$

donde  $R_1$  es el preset de  $1\text{k}\Omega$  y  $r_1$  es el preset de  $100\Omega$ .

$$\begin{aligned}
\Delta Q_x &= \left| \frac{\delta Q_x}{\delta R_3} \right| \cdot \Delta R_3 \\
&= \frac{1}{2\pi f C_3 R_3^2} \cdot \Delta R_3 \\
\Rightarrow \frac{\Delta Q_x}{Q_x} &= \frac{\Delta R_3}{R_3}
\end{aligned} \tag{3.11}$$

(Llenar con tabla de errores)  
Actualizar valores.

### 3.8. Conclusiones