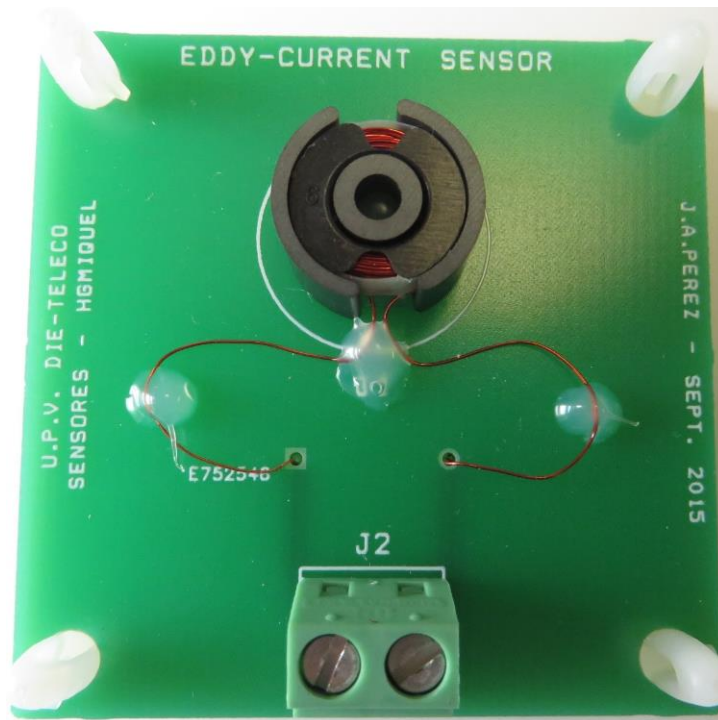


# *Sensor Inductivo de corrientes de Foucault*



Departamento de Ingeniería Electrónica - ETSIT - Universitat Politècnica de València

## **SENSOR INDUCTIVO DE CORRIENTES DE FOUCAULT**

1.- INTRODUCCIÓN.

2.- MATERIAL UTILIZADO.

3.- CIRCUITO PROPUESTO.

4.- DESARROLLO TEÓRICO.

4.1.- CIRCUITO EN PUENTE

4.2.- CIRCUITO CON A.O.

5.- DESARROLLO PRÁCTICO.

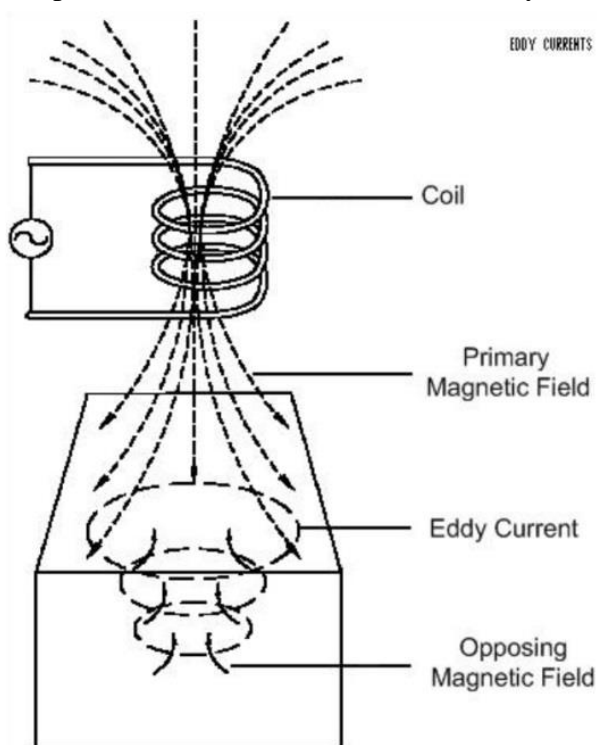
5.1.- CIRCUITO EN PUENTE DE MAXWELL

5.2.- CIRCUITO CON A.O.

6.- ESPECIFICACIONES.

## 1.- INTRODUCCIÓN.

Las corrientes de Foucault son corrientes inducidas en un conductor por la presencia de un flujo magnético variable. Debido a la ley de Faraday, un flujo magnético variable en un conductor origina la aparición de una fuerza electromotriz, y en consecuencia una corriente circular o de remolino (eddy current, en inglés).



Estas corrientes circulares originan un campo magnético de dirección perpendicular a la superficie de la espira de corriente, y de sentido contrario al campo que las genera, disminuyendo el campo neto en el interior de la bobina generadora, y por tanto, disminuyendo su inductancia (ver fig. 1). Debido a la generación de estas corrientes en el conductor se origina una pérdida de energía y una disipación de potencia por efecto Joule. Esta potencia disipada en el conductor varía con el cuadrado de la frecuencia del flujo magnético generador de las corrientes. Según la ley de Lenz, estas corrientes circulares de Foucault originan flujos magnéticos de sentido contrario al flujo que las origina, disminuyendo el flujo neto en el interior de la bobina, y por tanto, el valor de su inductancia. Las pérdidas por efecto Joule que se producen en el metal se reflejan en la inductancia de sensor mediante un aumento de la resistencia serie de la bobina.

Figura 1: Esquemático de la generación de las corrientes de Foucault en una superficie conductora.

El conjunto del sensor de corrientes de Foucault junto con el blanco a detectar puede modelarse mediante un transformador (ver fig.2).

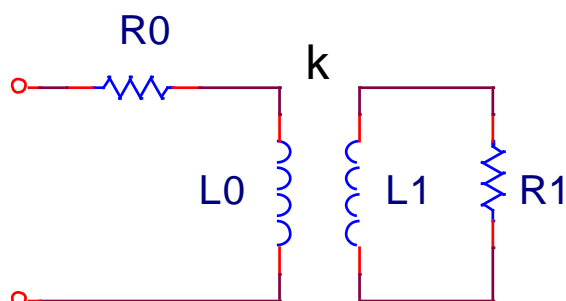


Figura 2: Modelo del sensor de corrientes de Foucault junto con el blanco a detectar.

El primario representa el sensor de corrientes de Foucault, y el secundario representa el blanco (pieza a detectar). La resistencia  $R_1$  representa la resistencia a las corrientes de Foucault que se generan en el blanco. La resistencia  $R_1$  es proporcional a la resistividad del blanco. El coeficiente de inducción mutua se relaciona con la distancia del sensor al blanco, de modo que el coeficiente  $M$  disminuye cuando incrementa la distancia. Aplicando las leyes de Kirchhoff en el dominio transformado de Laplace, podemos obtener las ecuaciones:

$$R_0 I_0 + sL_0 I_0 - sMI_1 = V$$

$$R_1 I_1 + sL_1 I_1 - sMI_0 = 0$$

El coeficiente de inducción mutua es:  $M = k\sqrt{L_0 L_1}$ , siendo  $k$  el factor de acoplamiento ( $k$  puede variar de 0 a 1). La impedancia compleja en el primario cuando hay un blanco será:

$$Z_{in} = R_0 + sL_0 + \frac{M^2 \omega^2}{R_1 + sL_1}$$

La resistencia y la inductancia del primario con un blanco serán:

$$R_{in} = R_0 + \frac{\omega^2 M^2 R_1}{R_1^2 + (\omega L_1)^2}$$

$$L_{in} = L_0 - \frac{\omega^2 M^2 L_1}{R_1^2 + (\omega L_1)^2}$$

## 2.- MATERIAL UTILIZADO.

- Módulo de prácticas con un sensor de corrientes de Foucault.
- Circuito integrado: amplificador de instrumentación integrado AD620.

## 3.- CIRCUITO PROPUESTO.

Los circuitos a diseñar, montar y medir en esta práctica son los siguientes:

1.- Los circuitos propuestos para la medida de la inductancia del sensor de corrientes de Foucault serán el puente de Hay (ver fig.3) y el puente de Maxwell (ver fig.4). El puente de Hay es recomendado para obtener el valor de una inductancia real cuando el factor de calidad  $Q$  es superior a 10 ( $Q > 10$ ). El puente de Maxwell es recomendado para obtener el valor de una inductancia real cuando el factor de calidad  $Q$  está comprendido entre 1 y 10 ( $1 < Q < 10$ ).

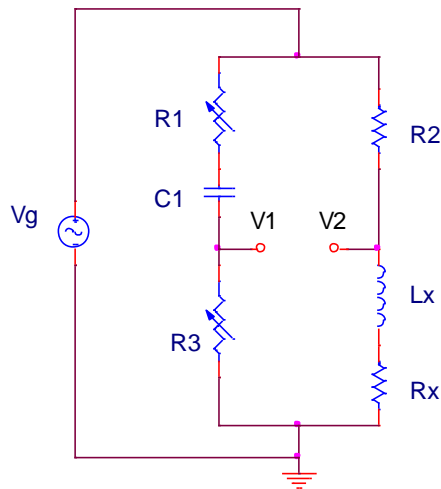


Figura 3: Puente de Hay.

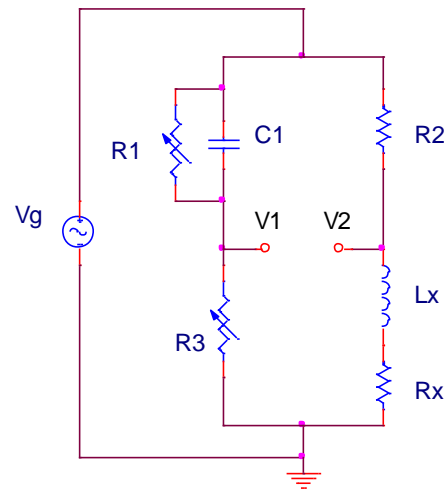


Figura 4: Puente de Maxwell.

2.- El acondicionador para el puente de Maxwell diseñado con objeto de obtener una tensión en función del espesor, distancia, dimensiones y conductividad de la pieza metálica a detectar será el mostrado en la fig.5, compuesto de un amplificador de instrumentación integrado (AD620) seguido de un detector de envolvente.

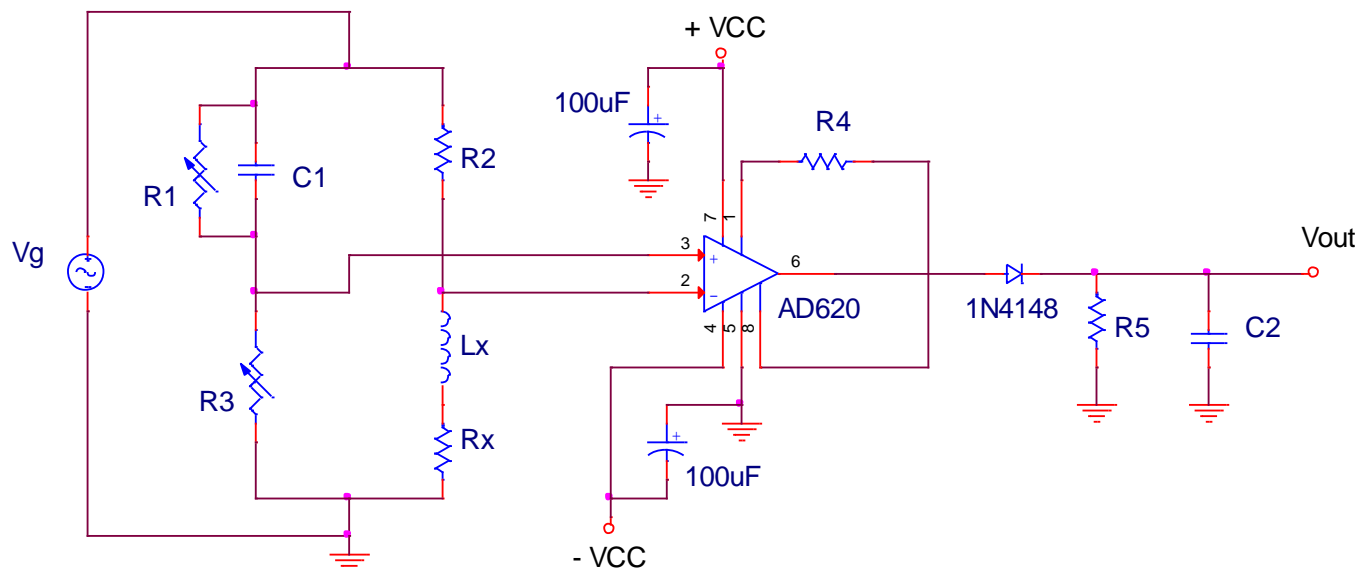


Figura 5: Circuito acondicionador para el Puente de Maxwell.

3.- Circuito con A.O. Otra alternativa para medir la inductancia del sensor consistirá en la utilización del acondicionador de señal de la fig.6, con el que se determinará la impedancia compleja de la bobina.

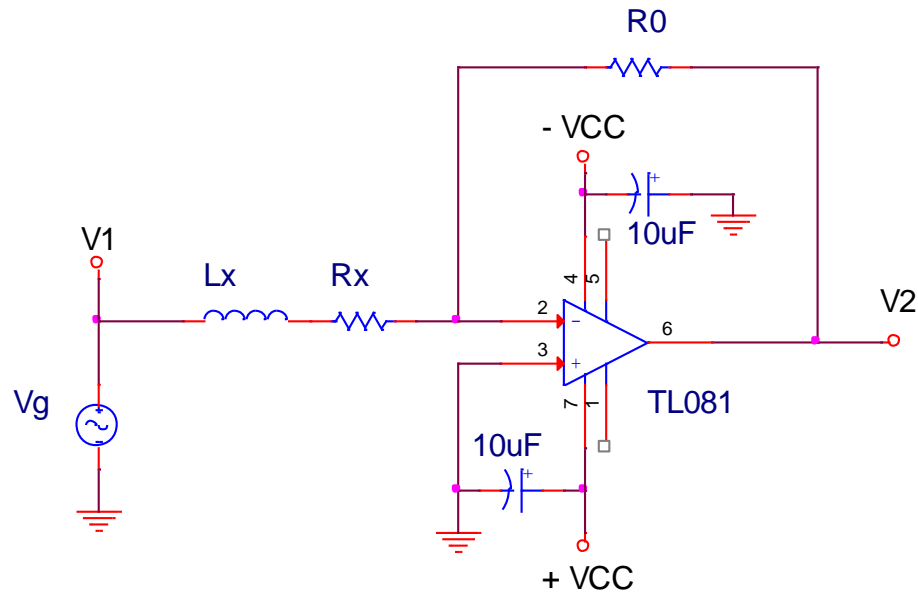


Figura 6: Circuito para la medida de  $L_x$  y  $R_x$ .

#### 4.- DESARROLLO TEÓRICO

##### 4.1.- CIRCUITO EN PUENTE

1.- Determinar el valor de las tensiones de salida del puente de Hay,  $V1$  y  $V2$  (ver fig.3) en función de los componentes del puente.

$$V1 = Vg * \frac{R3}{(R1 + R3 + \frac{1}{j\omega C})} \quad V2 = Vg * \frac{j\omega Lx + Rx}{(j\omega Lx + Rx + R2)}$$

2.- Determinar la condición de equilibrio del puente de Hay (tensión de salida del puente nula).

$$\left[ R1 - \frac{j}{\omega C1} \right] [Rx + j\omega Lx] = R2 * R3$$

3.- Para la condición de equilibrio del puente de Hay, determinar la expresión que relaciona  $Rx$  y  $Lx$  en función de los componentes del puente y la pulsación angular.

$$Rx = \frac{\omega^2 C_1^2 R_1 R_2 R_3}{1 + \omega^2 C_1^2 R_1^2} \quad Lx = \frac{R_2 R_3 C_1}{1 + \omega^2 C_1^2 R_1^2}$$

- 4.- Determinar el valor de las tensiones de salida del puente de Maxwell, V1 y V2 (ver fig.4) en función de los componentes del puente.

$$V1 = Vg * \frac{R3}{(R1 || \frac{1}{j\omega C1} + R3)} \quad V2 = Vg * \frac{j\omega Lx + Rx}{(j\omega Lx + Rx + R2)}$$

- 5.- Determinar la condición de equilibrio del puente de Maxwell (tensión de salida del puente nula).

$$Z_x = \frac{Z_2 Z_3}{Z_1} = R_2 R_3 \left[ \frac{1}{R_1} + j\omega C_1 \right] = R_x + j\omega L_x$$

- 6.- Para la condición de equilibrio del puente de Maxwell, determinar la expresión que relaciona Rx y Lx en función de los componentes del puente y la pulsación angular.

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1} \quad L_x = R_2 R_3 C_1$$

- 7.- Determinar el ancho de banda del amplificador de instrumentación integrado AD620, para G=1 y para G=100. Dar la expresión de la ganancia en función de la resistencia R4 (ver fig.5).

$$R_4 = \frac{49.4k\Omega}{G - 1}$$

- 8.- Explicar el funcionamiento del conjunto formado por el diodo 1N4148, la capacidad C2 y la resistencia R5. Explique el criterio de elección de C2 y R5 en función de la frecuencia del generador.

Detector de envolvente mediante el diodo para dejar pasar la señal en solo un sentido y el condensador junto con la resistencia para actuar como filtro paso bajo para suavizar la señal.

#### 4.2.- CIRCUITO CON A.O.

- 1.- Determinar, según especificaciones, el producto “ganancia por ancho de banda” (GBP) del A.O. TL081.

Typical: 4 MHz, Minimum: 2.5 MHz

- 2.- Para el circuito de la fig.6 determinar la impedancia de la bobina  $Z = R_x + j\omega L_x$ , en función de las tensiones V1, V2 y Ro.

$$Z_x = - \frac{V1 R_o}{V2}$$

- 3.- Determinar las expresiones que relacionan Rx y Lx en función del módulo de V1/V2, R, y el ángulo de desfase  $\phi$  entre V1 y V2.

$$R_x = -R_o \frac{|V1|}{|V2|} \cos \theta \quad L_x = - \frac{R_o |V1|}{\omega |V2|} \sin \theta$$

Donde  $\theta$  es el desfase entre V1 y V2.

## 5.- DESARROLLO PRÁCTICO.

### 5.1.- CIRCUITO EN PUENTE DE MAXWELL

- 1.- Midiendo con el medidor de impedancias de laboratorio en modo serie y 10kHz, rellenar la tabla siguiente:

$$Q = \omega L_x / R_x$$

Identificar el módulo de prácticas utilizado: Módulo n° = 8

Frecuencia	Componente	En vacío	5 céntimos	20 céntimos	1 euro
10 kHz	R <sub>x</sub>	2.4734Ω	58.25 Ω	9.479 Ω	3.7593 Ω
	L <sub>x</sub>	0.863 mH	1.0482 mH	0.674 mH	0.829 mH
	Q	22.682	1.1285	4.4563	13.818

NOTA: la impedancia medida varía según la cara de la moneda, por tanto, se sugiere colocar todas las monedas con la misma orientación, por ejemplo, con la cara donde figura el valor numérico de la moneda hacia arriba.

- 2.- Montar el circuito en puente de Maxwell de la fig.4 con  $V_g = 2 \sin(2\pi 10^4 t)$  y con los siguientes valores de los componentes. Medir con el medidor de impedancias el condensador C1 a 10kHz, y con el multímetro el valor de R2.

$$C1 = 22 \text{ nF}$$

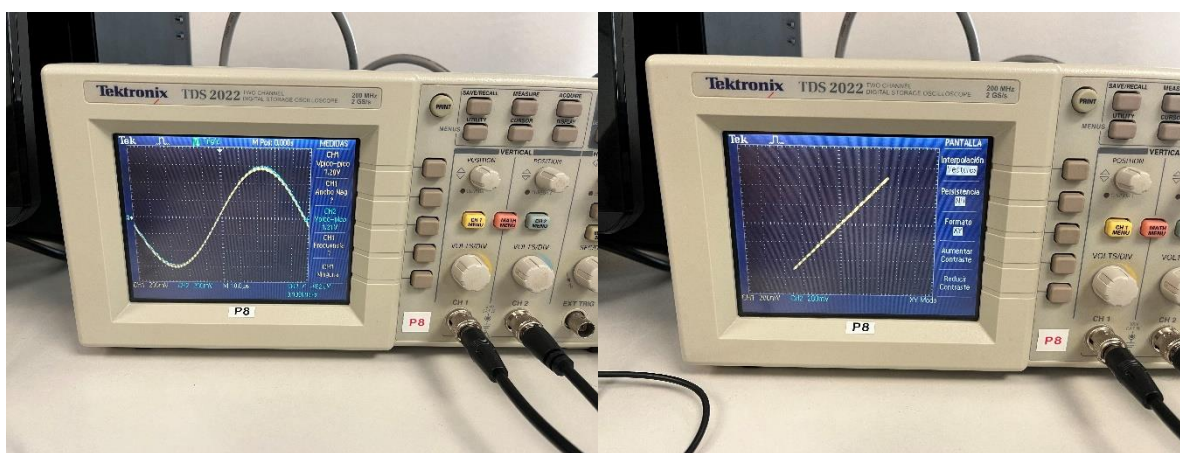
$$R2 = 100 \Omega$$

$$R1 = 50 \text{ k}\Omega$$

$$R3 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$C1 = 21.1 \text{ nF}$$

$$R2 = 97.39$$

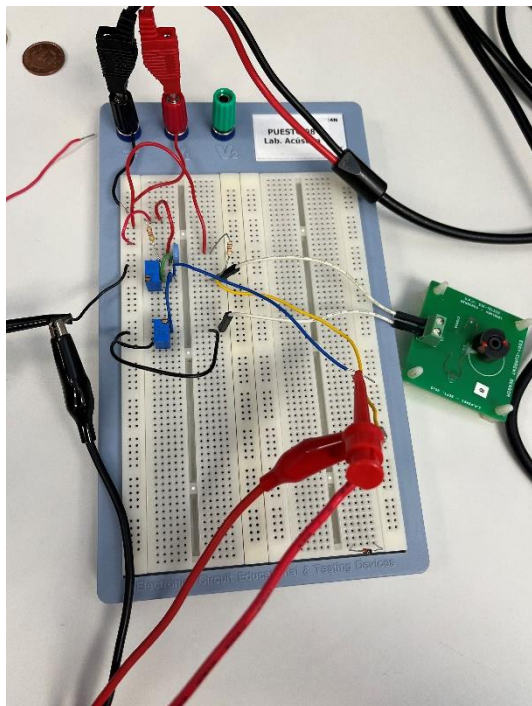


**Figuras 1 y 2: Desfase primario y secundario**

En las imágenes de arriba se observa cómo se ha conseguido que las dos señales sean iguales mediante los potenciómetros ajustando R3 para el módulo y R1 para la fase hasta conseguir dos señales idénticas. Esto se aprecia a la perfección en la figura de lissajous.



Determinar la impedancia de la bobina ( $R_x$ ,  $L_x$ ) utilizando las ecuaciones deducidas en el apartado 4.1.6, y ajustando  $R_1$  y  $R_3$  hasta que el puente este balanceado. Utilizando la moneda de 20 céntimos colocada sobre el sensor eddy, determinar la impedancia de la bobina y rellenar la siguiente tabla:



En la imagen de la izquierda observamos el montaje del puente de Maxwell el cual hemos usado en este apartado de la práctica para medir la inductancia y resistencia de la moneda de 20 céntimos.

Frecuencia	Componente	20 céntimos
10 kHz	$R_x$	$9.45 \, \Omega$
	$L_x$	$657.6 \, \mu\text{F}$
	$Q$	4.37
	$R_1$	$3.297 \text{ k} \, \Omega$
	$R_3$	$320 \, \Omega$

**Figura 3: Montaje del circuito**

Para los cálculos de  $L_x$  y  $R_x$  del puente de Maxwell se han usado las expresiones de los cálculos previos:

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1} \quad L_x = R_2 R_3 C_1$$

**Nota:** para balancear el puente, utilizar el modo XY (elipse de Lissajous). El ajuste es un proceso iterativo entre ajuste de amplitudes de  $V_1$  y  $V_2$  mediante el potenciómetro  $R_3$  y el ajuste de desfase nulo mediante  $R_1$ . Para visualizar la tensión de salida del puente active el canal matemático con la función CH1-CH2.

**3.-** Montar el circuito en puente de Maxwell y amplificador de la fig.5, con los valores del puente de Maxwell del apartado anterior y con los componentes siguientes:

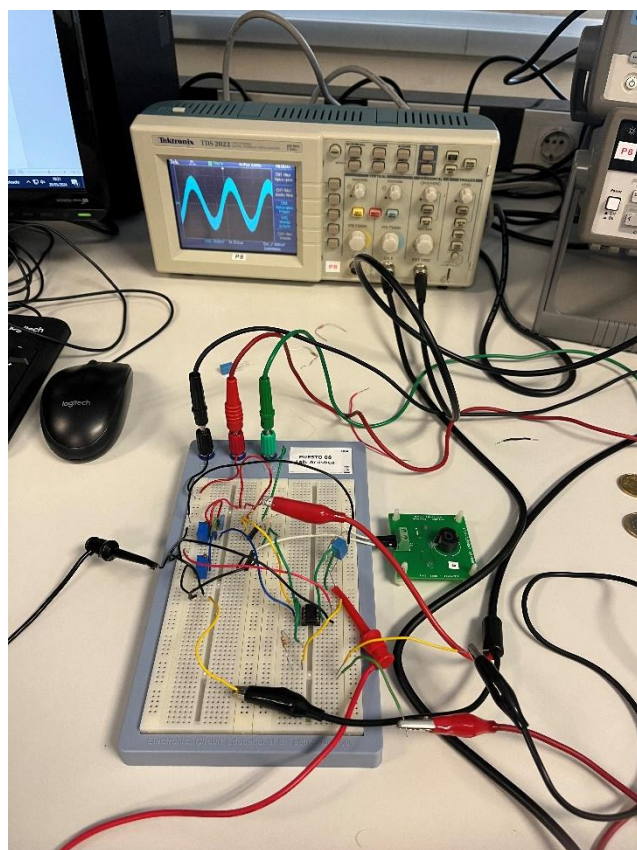
$$R_4 = 4,7 \, \text{k}\Omega \quad R_5 = 100 \, \text{k}\Omega \quad C_2 = 1 \, \mu\text{F}$$

$$R_4 = \frac{49.4 \, \text{k}\Omega}{G - 1}$$

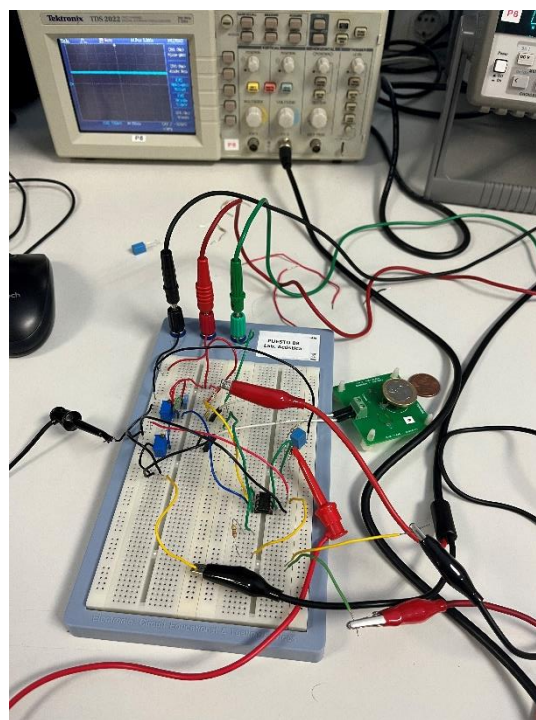
Determinar la ganancia del amplificador de instrumentación AD620:  $G = 11.51$

Determinar la impedancia del sensor ( $R_x$ ,  $L_x$ ) utilizando las ecuaciones deducidas en el apartado 4.1.6, y ajustando  $R_1$  y  $R_3$  hasta que el puente esté balanceado. Medir en el osciloscopio la tensión de salida del puente de Maxwell, midiendo a la salida del amplificador de instrumentación integrado AD620, de modo que es mucho más fácil el ajuste de balancear el puente de Maxwell. Utilizando monedas de 5 céntimos, 20 céntimos y 1 euro colocadas sobre el sensor Eddy, determinar la impedancia de la bobina y rellenar la siguiente tabla:

En esta imagen de la izquierda podemos observar el calibrar el cero en vacío. Para ello en vez de tomar directamente la salida  $V_o$  hemos tomado la salida previa al detector de envolvente para poder ver una senoide y de manera mas sencilla buscar su mínimo calibrando los potenciómetros.



En la imagen de la derecha podemos ver una medida tomada a la salida del circuito para la moneda de un euro.



**Figuras 4 y 5: Acondicionador con el puente de Maxwell**

Frecuencia	Componente	En vacío	5 céntimos	20 céntimos	1 euro
10 kHz	$R_x$	$2.97\Omega$	$69.39\Omega$	$9.88\Omega$	$13.83\Omega$
	$L_x$	$0.818\text{ mF}$	$0.937\text{ mF}$	$0.651\text{ mF}$	$0.799\text{ mF}$
	$Q$	17.30	0.85	4.14	3.63
	$R_1$	$13.07\text{ k}\Omega$	$640\Omega$	$3.125\text{ k}\Omega$	$2.74\text{ k}\Omega$
	$R_3$	$398\Omega$	$456\Omega$	$317\Omega$	$389\Omega$

- 4.- Utilizando el mismo circuito de la fig.5 del apartado anterior, ajustar los valores de los R1 y R3 para que la salida del puente de Maxwell con el sensor eddy en vacío este balanceado (tensión de salida nula). Medir la tensión de salida del circuito en vacío y para cada una de las monedas y rellenar la tabla siguiente:

Como la señal ha pasado por el detector de envolvente en estas medidas hablamos de voltaje medio.

Frecuencia/V <sub>OUT</sub>	En vacío	5 céntimos	20 céntimos	1 euro
10 kHz	-188 $\mu$ V	4.81 V	1.01 V	0.713 V

- 5.- Justificar el motivo por el cual con la moneda de 5 céntimos la inductancia aumenta mientras que para el resto disminuye.

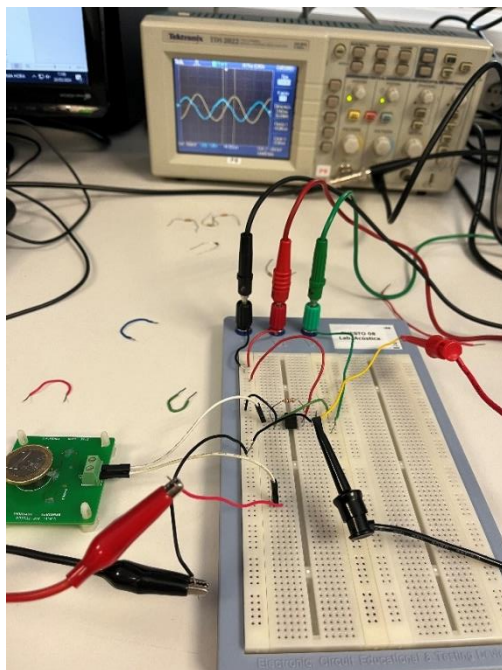
Porque la moneda de 5 céntimos es ferromagnética

## 5.2.- CIRCUITO CON A.O.

- 1.- Montar el circuito de la fig.6 con  $V_g = 1 \sin(\omega t)$  con los siguientes valores. Medir el valor de R0 con el multímetro y utilizar este valor para hacer los cálculos.

$$R_0 = 100 \, \Omega$$

$$R_0 = 99.61 \, \Omega$$



En la imagen de la izquierda observamos el montaje del circuito con el operacional usado también para medir la inductancia y resistencia de cada caso. Esta vez para ello sacaremos dos salidas a las que llamaremos V1 y V2. Mediremos su módulo y el desfase entre ambas y esto nos bastará para calcular la inductancia y resistencia.

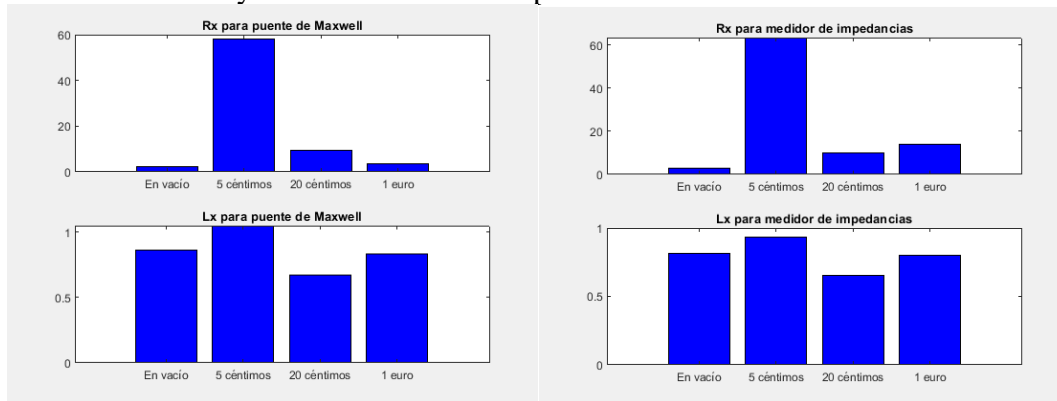
**Figura 6: Montaje del circuito con operacional**

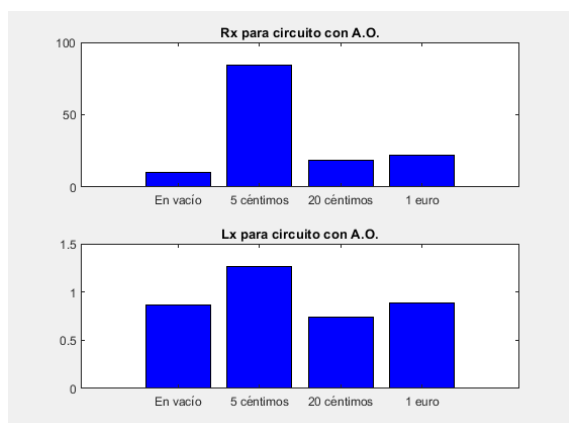
Utilizar el osciloscopio para medir las tensiones V1 y V2, visualizando simultáneamente una en cada canal del osciloscopio. Puede utilizarse la función matemática CH1/CH2, o determinar la relación de amplitudes de V1 y V2 y su desfase para obtener la impedancia. De las medidas obtenidas en el osciloscopio determinar el módulo y fase de la impedancia de la bobina, así como Rx y Lx en vacío, y con las monedas de 5 céntimos, 20 céntimos y 1 euro. Rellenar la tabla siguiente:

Para ello hemos sacado al osciloscopio V1 y V2 para medir su desfase nos hemos sacado 2 cursores verticales. Este desfase está en segundos y hay que hacer una sencilla regla de 3 para pasarlo a radianes.

Frecuencia	Componente	En vacío	5 céntimos	20 céntimos	1 euro
10 kHz	V1	1.34Vpp	1.44Vpp	1.18Vpp	1.28Vpp
	V2	2.4Vpp	1.24Vpp	2.36Vpp	2.12Vpp
	Z	5.81	97.96	9.17	13.37
	$\phi_Z$	28us=1.759 rad	38us=2.388 rad	31us=1.948 rad	31us=1.948 rad
	Rx	10.41 $\Omega$	84.36 $\Omega$	18.34 $\Omega$	22.15 $\Omega$
	Lx	0.869 mH	1.26 mH	0.737 mH	0.890 mH

**2.-** Comparar las medidas obtenidas con el puente de Maxwell y con el circuito con A.O. Trazar las gráficas con la información de Rx y Lx en el eje de coordenadas y la moneda (o ausencia de ella) en el eje de abscisas (equiespaciadas), para las medidas realizadas con el puente de Maxwell, con el circuito con A.O. y con el medidor de impedancias.





### Gráficos mostrando comparativa de inductancias y resistencias para los distintos métodos de medida y las distintas monedas

Para los cálculos de Lx y Rx se han usado las siguientes expresiones:

$$R_x = -R_o \frac{|V_1|}{|V_2|} \cos \theta \quad L_x = -\frac{R_o}{w} \frac{|V_1|}{|V_2|} \sin \theta$$

Donde theta es el ángulo de desfase entre V1 y V2 en radianes.

Por otro lado, el modulo de la impedancia, es la relación de V1 y V2 multiplicado por Rx.

	Medida	En vacío	5 céntimos	20 céntimos	1 euro
PUENTE MAXWELL	R <sub>x</sub> (Ω)	2.97Ω	69.39 Ω	9.88 Ω	13.83 Ω
	L <sub>x</sub> (mH)	0.817 mH	0.937 mH	0.651 mH	0.799 mH
CIRCUITO A.O.	R <sub>x</sub> (Ω)	10.41 Ω	84.36 Ω	18.34 Ω	22.15 Ω
	L <sub>x</sub> (mH)	0.869 mH	1.26 mH	0.737 mH	0.890 mH

## 6.- ESPECIFICACIONES.

Se adjuntan las especificaciones correspondientes a los siguientes componentes o material utilizado:

- Amplificador de instrumentación integrado: AD620
- Amplificador operacional de entrada JFET: TL081