

Universidad Pontificia de Comillas
I.C.A.I

Laboratorio de Instrumentación Eléctrica
4º I.E.M

Gonzalo Sánchez
Antonio Rubí
Ignacio Sanz

Práctica n°1: Medida de Resistencias

Laboratorio de Instrumentación Eléctrica
4°B, I.E.M

Gonzalo Sánchez Contreras

Antonio Rubí Rodríguez

Ignacio Sanz Soriano

26 de septiembre de 2016

Ensayo 1.1: Medida de una resistencia con voltímetro y amperímetro

Medidas: La intensidad medida en el amperímetro con alcance de 20 mA (el amperímetro en este alcance presenta 2 decimales) es:

$$I = 19.97 \text{ mA}$$

Las incertidumbres absoluta y relativa en la medida de la intensidad son:

$$\begin{aligned}\alpha(I) &= \frac{0.8}{100} \cdot I + 0.01 = \frac{0.8}{100} \cdot 19.97 + 0.01 = 0.1698 \text{ mA} \\ \varepsilon(I) &= \frac{\alpha(I)}{I} \cdot 100 = \frac{0.1698}{19.97} \cdot 100 = 0.85 \%\end{aligned}$$

La tensión medida en el voltímetro con alcance de 20 V (el voltímetro en este alcance presenta 3 decimales) es:

$$U = 7.501 \text{ V}$$

Las incertidumbres absoluta y relativa en la medida de la tensión son:

$$\begin{aligned}\alpha(U) &= \frac{0.05}{100} \cdot U + 3 \cdot 0.001 = \frac{0.05}{100} \cdot 7.501 + 3 \cdot 0.001 = 6.751 \text{ mV} \\ \varepsilon(U) &= \frac{\alpha(U)}{U} \cdot 100 = \frac{6.751 \cdot 10^{-3}}{7.501} \cdot 100 = 0.09 \%\end{aligned}$$

Resultados: El valor de R_x es:

$$R_x = \frac{U}{I} = \frac{7.501}{19.97} = 375.61 \Omega$$

La incertidumbre de R_x tiene la forma:

$$\varepsilon(R_x) = \varepsilon(U) + \varepsilon(I) = 0.85 \% + 0.09 \% = 0.94 \%$$

Finalmente se tiene la siguiente medida de la resistencia R_x :

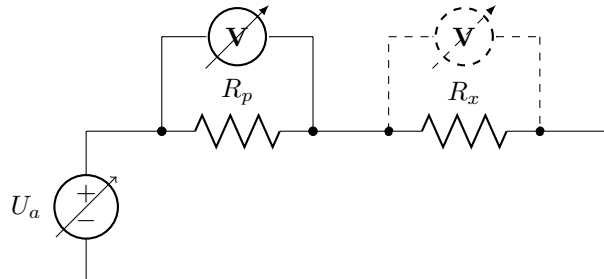
$$R_x = 375.61 \pm 3.53 \Omega = 375.61 \Omega \pm 0.94 \%$$

Conclusiones: La resistencia medida R_x en el ensayo tiene un valor de 375.61Ω que resulta apreciablemente similar al valor teórico de 380Ω . La incertidumbre de la medida de la resistencia es debida en gran parte a la incertidumbre del amperímetro (un 90 % de toda la incertidumbre $\varepsilon(R_x)$). Se podría mejorar la incertidumbre de la medida si se utilizará un multímetro de mejor precisión (por ejemplo, de 20000 cuentas). El intervalo de valores posibles es $[372.02 \Omega, 379.14 \Omega]$ y aunque el valor de 380Ω no está comprendido en el intervalo, la precisión de la medida es mejor que la dada por el fabricante.

Ensayo 1.2: Método de comparación

Enunciado: Medida de una resistencia de un valor de aproximadamente $380\ \Omega$, 5 W, por el método de comparación de tensiones.

Esquema:



Preparación:

Selección del voltímetro. En primer lugar, se elige el voltímetro con mayor precisión de entre los disponibles. Los polímetros disponibles presentan las siguientes incertidumbres de medida funcionando como voltímetros:

Voltímetro	Incertidumbre
PROMAX FP-2b (2000 cuentas)	0.5 %lect. + 1 dig. en CC.
PROMAX PD-183 (20000 cuentas)	0.05 %lect. + 3 dig. en CC.

Se elegirá el voltímetro PROMAX PD-183 (20000 cuentas) por tener una incertidumbre menor en la medida en comparación con el voltímetro de 2000 cuentas.

Selección de la resistencia patrón (R_p). Esta resistencia habrá de ser lo más parecida posible a la resistencia que se desea medir para minimizar el error sistemático frente a la incertidumbre de medida. De entre las posibles resistencias para diseñar R_p , se utilizarán las 2 cajas de resistencias de clase 0.1, 0.25 W, por ser las que mayor precisión presentan. Respecto a la magnitud de R_p , se analizarán las dos siguientes opciones:

$$R_p = 100\ \Omega$$

$$R_p = 500\ \Omega$$

La resistencia de $500\ \Omega$ se obtendrá del paralelo de dos resistencias de valor $1000\ \Omega$, clase 0.1, 0.25 W. Ahora se comparan el valor de las dos resistencias posibles con el valor de la que se desea medir (R_x):

$$R_p = 100 \rightarrow \frac{380\ \Omega}{100\ \Omega} = 3.8$$

$$R_p = 500 \rightarrow \frac{500\ \Omega}{380\ \Omega} = 1.32$$

La resistencia de $500\ \Omega$ es 1.32 veces la R_x , frente a las 3.8 veces de la resistencia de $100\ \Omega$, por lo que se seleccionará como resistencia patrón la de $500\ \Omega$. Se calculan los límites de corriente y de tensión de la resistencia patrón:

$$I_{m\acute{a}x} = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{0.25}{500}} = 31.62\ mA$$

$$U_{m\acute{a}x} = \sqrt{P \cdot R} = \sqrt{0.5 \cdot 500} = 15.81\ V$$

Con una tensión máxima de $15.81\ V$, se descarta fijar una tensión coincidente con el límite de alcance del voltímetro de $20\ V$ en R_p (o superiores alcances) en dicha resistencia, por lo que se

fijará una tensión coincidente con el límite de alcance de 2 V para no dañarla. Teniendo 2 V en R_p , en R_x se tienen:

$$U_x = \frac{R_x}{R_p} \cdot U_p = \frac{380}{500} \cdot 2 = 1.52 \text{ V}$$

La incertidumbre esperada en la medida será:

$$\varepsilon(R_x) = \varepsilon(R_p) + \varepsilon(U_x) + \varepsilon(U_p)$$

a) $\varepsilon(\mathbf{R_p})$. La incertidumbre relativa de dos resistencias del mismo valor y clase en paralelo es la misma que la incertidumbre relativa de la resistencia de una de ellas.

$$\varepsilon(R_p) = 0.1 \%$$

b) $\varepsilon(\mathbf{U_x})$. La incertidumbre relativa en la medida de la tensión en U_x es:

$$\begin{aligned} \alpha(U_x) &= \frac{0.05}{100} \cdot U_x + 3 \cdot 0.0001 = \frac{0.05}{100} \cdot 1.52 + 3 \cdot 0.0001 = 0.00106 \text{ V} \\ \varepsilon(U_x) &= \frac{\alpha(U_x)}{U_x} \cdot 100 = \frac{0.00106}{1.52} \cdot 100 = 0.0697 \% \end{aligned}$$

c) $\varepsilon(\mathbf{U_p})$. La incertidumbre relativa en la medida de la tensión en U_p es:

$$\begin{aligned} \alpha(U_p) &= \frac{0.05}{100} \cdot U_p + 3 \cdot 0.0001 = \frac{0.05}{100} \cdot 1.9999 + 3 \cdot 0.0001 = 1.3 \cdot 10^{-3} \text{ V} \\ \varepsilon(U_p) &= \frac{\alpha(U_p)}{U_p} \cdot 100 = \frac{1.3 \cdot 10^{-3}}{1.9999} \cdot 100 = 0.065 \% \end{aligned}$$

La incertidumbre en R_x será:

$$\begin{aligned} \varepsilon(R_x) &= \varepsilon(R_p) + \varepsilon(U_x) + \varepsilon(U_p) = \\ &= 0.1 \% + 0.0697 \% + 0.065 \% = \\ &= 0.2347 \% \end{aligned}$$

La corriente que circulará por ambas resistencias es:

$$I = \frac{U_p}{R_p} = \frac{U_x}{R_x} = 4 \text{ mA}$$

Se comprueban los límites de potencia de ambas resistencias:

$$\begin{aligned} P_{R_p} &= I^2 \cdot R_p = 8 \text{ mW} \leq 0.25 \text{ W} \\ P_{R_x} &= I^2 \cdot R_x = 6.08 \text{ mW} \leq 0.5 \text{ W} \end{aligned}$$

Selección de las fuentes. De las distintas fuentes disponibles en el laboratorio, se procede a analizar la más adecuada para el ensayo:

- Se descarta la fuente de tensión fija de 5 V, por la necesidad de ir regulando la tensión en la resistencia patrón R_p .
- La fuente de intensidad de 7-11 mA también se descarta por ser inferior la intensidad requerida.
- Se utilizará la fuente de tensión regulable de 2x30 V, $I_{máx}=3 \text{ A}$, $\Delta U=0.2 \text{ V}$, concretamente, solo una de ellas.

Por último, la resolución en ambas resistencias tendrá la forma:

$$\begin{aligned} \Delta U_p &= \frac{R_p}{R_x + R_p} \cdot \Delta U = \frac{500}{380 + 500} \cdot 0.2 = 0.1136 \text{ V} \\ \Delta U_x &= \frac{R_x}{R_x + R_p} \cdot \Delta U = \frac{380}{380 + 500} \cdot 0.2 = 0.0863 \text{ V} \end{aligned}$$

Lista de aparatos:

Precisión:

- V: Multímetro digital PROMAX PD-183 (20000 cuentas).
Como voltímetro: 200mV, 2, 20, 200, 1000V. Resistencia interna: 10 MΩ.
Precisión: 0.05 %lect. + 3dígs. en CC.
- R_p : 2 cajas de resistencias (sólo se puede utilizar una de las resistencias de cada caja): 100Ω, 1kΩ, 10kΩ, 100kΩ; clase 0.1, 0.25W.

Auxiliares:

- U_a : Fuente doble regulable 2x30V. Para cada fuente: $I_{max}=3A$; Resolución: 0.2 V.

Medidas: Tensión medida en la resistencia patrón (R_p), $U_p = 1.9945$ V (el voltímetro en un alcance 2 V presenta 4 decimales). La incertidumbre en la medida es:

$$\alpha(U_p) = \frac{0.05}{100} \cdot U_p + 3 \cdot 0.0001 = \frac{0.05}{100} \cdot 1.9945 + 3 \cdot 0.0001 = 0.0013 \text{ V}$$

$$\varepsilon(U_p) = \frac{\alpha(U_p)}{U_p} \cdot 100 = \frac{0.0013}{1.9945} \cdot 100 = 0.065 \%$$

Por tanto:

$$U_p = 1.9945 \pm 0.0013 \text{ V} = 1.9945 \text{ V} \pm 0.065 \%$$

Tensión medida en la resistencia a medir (R_x), $U_x = 1.5115$ V (el voltímetro en un alcance 2 V presenta 4 decimales). La incertidumbre en la medida es:

$$\alpha(U_x) = \frac{0.05}{100} \cdot U_x + 3 \cdot 0.0001 = \frac{0.05}{100} \cdot 1.5115 + 3 \cdot 0.0001 = 0.0011 \text{ V}$$

$$\varepsilon(U_x) = \frac{\alpha(U_x)}{U_x} \cdot 100 = \frac{0.0011}{1.5115} \cdot 100 = 0.0698 \%$$

Por tanto:

$$U_x = 1.5115 \pm 0.00106 \text{ V} = 1.5115 \text{ V} \pm 0.0698 \%$$

Resumiendo, queda:

	$\mathbf{X_i}$	$\alpha(\mathbf{X_i})$	$\varepsilon(\mathbf{X_i})$
R_p	500 Ω	0.500 Ω	0.1 %
U_p	1.9945 V	0.0013 V	0.065 %
U_x	1.5115 V	0.0011 V	0.0698 %

Resultados: La resistencia medida R_x será:

$$R_x = \frac{U_x}{U_p} \cdot R_p = \frac{1.5115}{1.9945} \cdot 500 = 378.92 \Omega$$

La incertidumbre en R_x será:

$$\begin{aligned} \varepsilon(R_x) &= \varepsilon(R_p) + \varepsilon(U_x) + \varepsilon(U_p) = \\ &= 0.1 \% + 0.0698 \% + 0.065 \% = \\ &= 0.2348 \% \end{aligned}$$

La resistencia medida R_x será:

$$R_x = 378.92 \pm 0.50 \Omega = 378.92 \Omega \pm 0.235 \%$$

Conclusiones: Con este método se ha tratado de medir haciendo uso de un voltímetro en paralelo con una resistencia para evitar el uso del amperímetro. El valor obtenido en la medida de la resistencia ha sido de 378.92Ω , que es bastante similar a 380Ω . Siendo el valor de la resistencia a medir de $380 \Omega \pm 5 \%$, se observa que el valor medido esta dentro del rango de posibles valores proporcionados por el fabricante.

Dentro de la incertidumbre de R_x , el 42.6% de la misma se debe a incertidumbre de la resistencia patrón (R_p), el 27.7% a la incertidumbre de la tensión en la resistencia patrón (U_p), y un 29.7% a la incertidumbre de la tensión en la resistencia a medir (U_x).

La incertidumbre en la medida de R_x es menor que la del fabricante.

Ensayo 1.3: Medida de una resistencia con puente de Wheatstone

Enunciado: Medida de una resistencia de un valor de aproximadamente 380 Ω , 5 W con puente de Wheatstone.

Medidas:

Polímetro digital de 2000 cuentas:

$$R_2 = [3780, 3868] \Omega$$

Polímetro digital de 20000 cuentas:

$$R_2 = [3790, 3791] \Omega$$

Resultados:

- *Polímetro de 2000 cuentas como amperímetro.* Se modifica la resistencia R_2 hasta conseguir una intensidad medida en el amperímetro de valor 0 A. Se comprueba que existe un rango de valores de $R_2, [3780, 3868] \Omega$ para los que la medida del amperímetro permanece en 0. Esto se debe a un error de insensibilidad (ε_{ins}) del aparato digital. El valor de R_2 a tener en cuenta será el valor medio del intervalo en el que la intensidad permanece a 0, por lo que:

$$R_2 = \frac{R_{2,máx} - R_{2,mín}}{2} = \frac{3868 - 3780}{2} = 3824 \Omega$$

La incertidumbre asociada a la medida de R_2 tiene la forma:

$$\alpha(R_2) = \frac{0.1}{100} \cdot 3000 + \frac{0.1}{100} \cdot 800 + \frac{1}{100} \cdot 20 + \frac{1}{100} \cdot 4 = 4.04 \Omega$$

$$\varepsilon(R_2) = \frac{\alpha(R_2)}{R_2} \cdot 100 = \frac{4.04}{3824} \cdot 100 = 0.106 \%$$

Ahora se calcula el error de insensibilidad del aparato (ε_{ins}):

$$\varepsilon_{ins} = \frac{R_{2,máx} - R_{2,mín}}{2} = \frac{3868 - 3780}{2 \cdot 3824} = 1.151 \%$$

Finalmente, la incertidumbre relativa total en la medida de R_x es:

$$\varepsilon(R_x) = \varepsilon(R_1) + \varepsilon(R_2) + \varepsilon(R_3) + \varepsilon_{ins} = 0.1 \% + 0.106 \% + 0.1 + 1.151 \% = 1.46 \%$$

Teniendo en cuenta que R_x es :

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} \cdot R_3 = \frac{100}{1000} \cdot 3824 = 382.4 \Omega$$

La medida de R_x es:

$$R_x = 382.40 \pm 5.58 \Omega = 382.40 \Omega \pm 1.46 \%$$

- *Polímetro de 20000 cuentas.* Se modifica la resistencia R_2 para que la lectura de la intensidad en el amperímetro sea nula. Sin embargo, esto no se logra conseguir ya que para el intervalo de $[3790, 3791] \Omega$, la intensidad cambia de valor y de signo y no llega a hacerse 0, por lo que se tiene un problema de resolución en el aparato digital. El valor de R_2 a tener en cuenta será el valor medio del intervalo:

$$R_2 = \frac{R_{2,máx} - R_{2,mín}}{2} = \frac{3791 - 3790}{2} = 3790.5 \Omega$$

La incertidumbre asociada a la medida de R_2 tiene la forma:

$$\alpha(R_2) = \frac{0.1}{100} \cdot 3000 + \frac{0.1}{100} \cdot 700 + \frac{1}{100} \cdot 90 + \frac{1}{100} \cdot 0 = 4.6 \, \Omega$$

$$\varepsilon(R_2) = \frac{\alpha(R_2)}{R_2} \cdot 100 = \frac{4.6}{3790} \cdot 100 = 0.121 \, \%$$

Ahora se calcula el error de resolución del aparato (ε_{res}):

$$\varepsilon_{res} = \frac{\Delta R_2}{2 \cdot R_2} = \frac{1}{2 \cdot 3824} = 0.0131 \, \%$$

Finalmente, la incertidumbre relativa total en la medida de R_x es:

$$\varepsilon(R_x) = \varepsilon(R_1) + \varepsilon(R_2) + \varepsilon(R_3) + \varepsilon_{ins} = 0.1 \, \% + 0.121 \, \% + 0.1 \, \% + 0.0131 \, \% = 0.334 \, \%$$

Teniendo en cuenta que R_x es :

$$R_x = \frac{R_3}{R_1} \cdot R_2 = \frac{100}{1000} \cdot 3790.5 = 379.05 \, \Omega$$

La medida de R_x es:

$$R_x = 379.05 \pm 1.27 \, \Omega = 379.05 \, \Omega \pm 0.334 \, \%$$

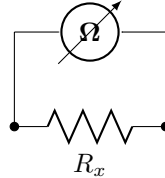
Conclusiones: Con el método del puente de Wheatstone se presentan dos problemas relacionados con la incertidumbre de la medida. La incertidumbre debida a insensibilidad (ε_{ins}) es mucho mayor que la debida a la de resolución (ε_{res}), por lo que se podría incluso despreciar esta última debido a su pequeño valor frente a las incertidumbres de las otras dos resistencias R_1 , R_2 , R_3 .

De esta forma, es preferible para esta configuración, una medida con un multímetro de buena precisión (20000 cuentas), ya que la precisión de la medida es mejor. El intervalo de valores de la resistencia es $[380.32, 377.78] \, \Omega$, por lo que el valor de $380 \, \Omega$ está comprendida en el intervalo siendo la precisión de la medida mejor que la del fabricante.

Ensayo 1.4: Aparato de medida directa

Enunciado: Medida de una resistencia de un valor de aproximadamente $380\ \Omega$, $5\ \text{W}$ con aparato digital.

Esquema de conexión:



Preparación: Se dispone de dos ohmímetros en el laboratorio, por lo que se seleccionará aquel que posea mayor precisión en la medida.

- Polímetro digital PROMAX FP-2b (2000 cuentas):

$$\alpha(R_x) = \frac{0.8}{100} \cdot R_x + 1 = \frac{0.8}{100} \cdot 380 + 1 = 4.04\ \Omega$$

$$\varepsilon(R_x) = \frac{\alpha(R_x)}{R_x} \cdot 100 = \frac{4.04}{380} \cdot 100 = 1.06\ \%$$

- Multímetro digital PROMAX PD-183 (20000 cuentas):

$$\alpha(R_x) = \frac{0.15}{100} \cdot R_x + 3 \cdot 0.1 = \frac{0.15}{100} \cdot 380 + 3 \cdot 0.1 = 0.87\ \Omega$$

$$\varepsilon(R_x) = \frac{\alpha(R_x)}{R_x} \cdot 100 = \frac{0.87}{380} \cdot 100 = 0.22\ \%$$

Se medirá con el multímetro digital PROMAX PD-183.

Lista de Aparatos:

Precisión:

- Multímetro digital PROMAX PD-183 (20000 cuentas): $200\ \Omega$, $\underline{2}$, 20 , $200\ \text{k}\Omega$, 2 , $20\ \text{M}\Omega$.
Precisión: $0.15\ \%\text{lect.} + 3\text{dígs.}$

Medidas: La medida de R_x resulta:

$$R_x = 379.4\ \Omega$$

La incertidumbre en la medida tiene la forma:

$$\alpha(R_x) = \frac{0.15}{100} \cdot R_x + 3 \cdot 0.11 = \frac{0.15}{100} \cdot 379.4 + 3 \cdot 0.11 = 0.869\ \Omega$$

$$\varepsilon(R_x) = \frac{\alpha(R_x)}{R_x} \cdot 100 = \frac{0.869}{379.4} \cdot 100 = 0.23\ \%$$

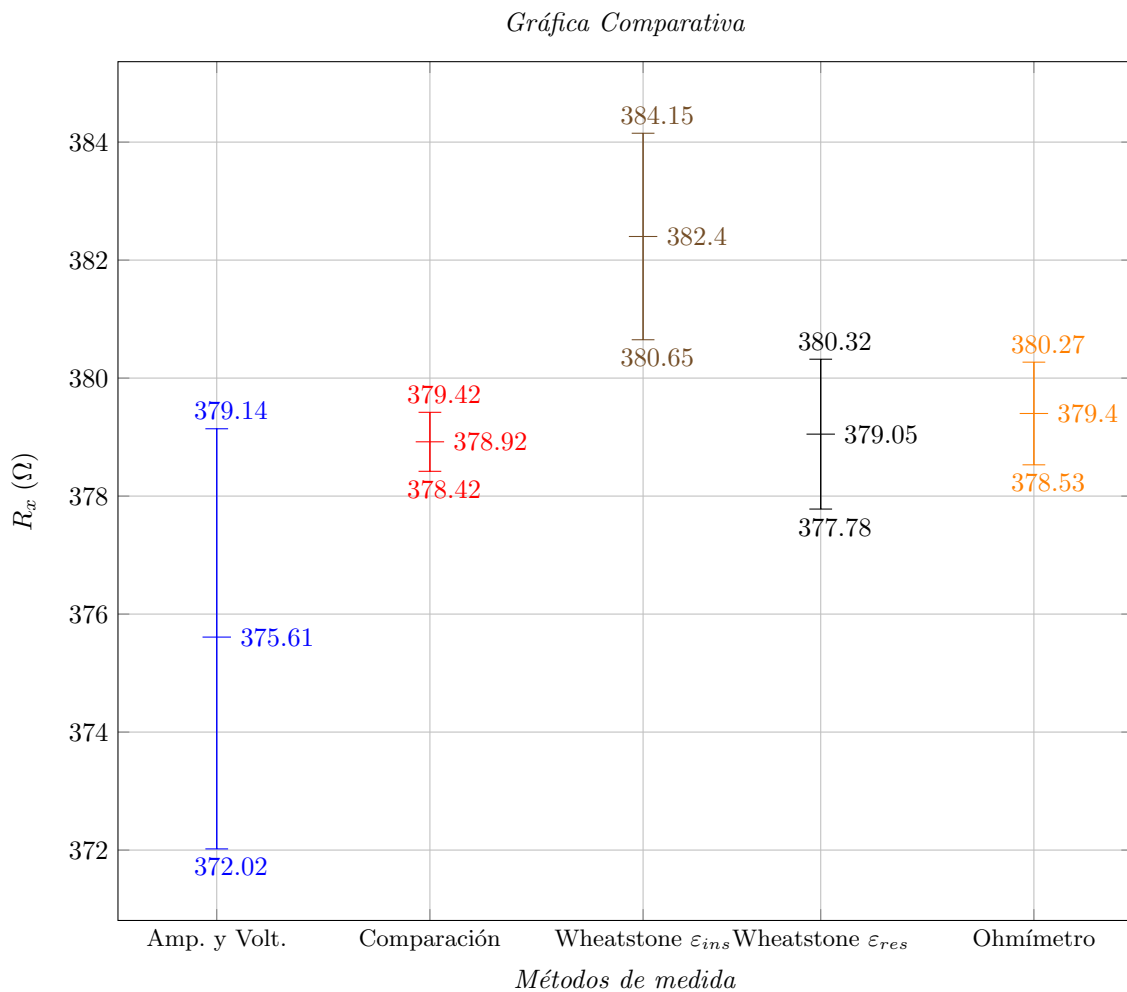
Resultados:

$$R_x = 0.3794 \pm 8.691 \cdot 10^{-4}\ \text{k}\Omega$$

$$R_x = 379.40 \pm 0.87\ \Omega = 379.40\ \Omega \pm 0.23\ \%$$

Conclusiones: Se comprueba que efectivamente la medida con el multímetro de 20000 cuentas como ohmímetro tiene muy buena precisión. El intervalo de valores es $[378.53, 380.27]\ \Omega$, por lo que el valor de $380\ \Omega$ se encuentra comprendido en el intervalo de posibles valores, pero la medida realizada presenta una precisión bastante buena.

Gráfica Comparativa de Resultados:



De la gráfica se deduce que el método que mejor precisión arroja con los aparatos disponibles en el laboratorio, es el método de comparación de tensiones. Aunque no se encuentre entre el rango de valores los 380Ω de valor inicial aproximado de la R_x , dato proporcionado por el fabricante, la precisión es la mejor de entre todos los métodos.

También proporciona una buena precisión la medida directa con multímetro, y el que peor precisión tiene es el método de voltímetro y amperímetro, cuyo intervalo de posibles valores es considerablemente mayor a todos los demás. Es posible que con otros aparatos, la precisión de los métodos varíe, pudiendo ser más precisos métodos de medida que con los aparatos disponibles no lo son tanto.

Práctica n°2: Medida de Resistencias Pequeñas, Resistencias de Aislamiento y Resistencias de Puesta a Tierra

Laboratorio de Instrumentación Eléctrica
4°B, I.E.M

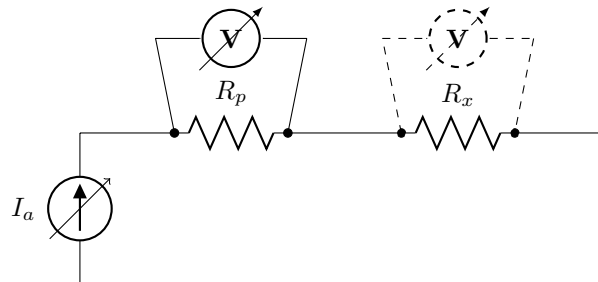
Gonzalo Sánchez Contreras
Antonio Rubí Rodríguez
Ignacio Sanz Soriano

10 de octubre de 2016

Ensayo 2.1: Medida de una resistencia pequeña por comparación

Enunciado: Medida de una resistencia de un valor de aproximadamente 25 mΩ, por el método de comparación de tensiones.

Esquema:



Preparación:

Selección del voltímetro. En primer lugar, se elige el voltímetro con mayor precisión de entre los disponibles. Los polímetros disponibles presentan las siguientes incertidumbres de medida funcionando como voltímetros:

Voltímetro	Incertidumbre
PROMAX FP-2b (2000 cuentas)	0.8 %lect. + 1 dig. en CC.
PROMAX PD-183 (20000 cuentas)	0.05 %lect. + 3 dig. en CC.
FLUKE 175 (6000 cuentas, verdadero valor eficaz)	0.15 %lect.+2 dig. en CC.

Se elegirá el voltímetro PROMAX PD-183 (20000 cuentas) por tener una incertidumbre menor en comparación con los voltímetros PROMAX FP-2b (2000 cuentas) y FLUKE 175 (6000 cuentas).

Selección de la resistencia patrón (R_p). Las resistencias disponibles que presentan mejor precisión son las de 10 mΩ, y 100 mΩ con un 0.1 %. El resto de resistencias presentan peor precisión (resistencia de 60 mΩ, 0.5 %, 5A) o bien no cumplen los límites de potencia (2 resistencias de 100 Ω, 0.1 % en paralelo, 0.25 W cada una) para las condiciones posibles del ensayo.

1. Resistencia patrón de 10 mΩ, 1W ($R_p = 10 \text{ m}\Omega$). Con esta resistencia tan pequeña, se necesitan altas corrientes para conseguir una caída de tensión que este próxima a los alcances del voltímetro, que haga que la precisión en la medida de la tensión sea lo mejor posible. La máxima corriente disponible es de 3 A, con la fuente de tensión regulable, por lo que se tiene:

$$R_p = 10 \text{ m}\Omega \left\{ \begin{array}{l} I_{m\acute{a}x} = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{1}{0.01}} = 10 \text{ A} \\ U_{m\acute{a}x} = \sqrt{P \cdot R} = \sqrt{1 \cdot 0.01} = 100 \text{ mV} \end{array} \right.$$

Opción	R_P (mΩ)	$\varepsilon(R_p)$	U_p	Alcance	$\varepsilon(U_p)$	U_x	Alcance	$\varepsilon(U_x)$	$\varepsilon(R_x)$
1	10	0.1 %	30 mV	200 mV	0.15 %	250 mV	2 V	0.17 %	0.42 %

2. Resistencia patrón de 100 mΩ, 2 W ($R_p = 100 \text{ m}\Omega$). Con esta resistencia se pueden conseguir tensiones iguales al alcance del voltímetro con intensidades más pequeñas. En este ensayo, se probará con una intensidad de 2 A, para conseguir 200 mV en la R_p , y también se probará con intensidad máxima disponible de 3 A.

$$R_p = 100 \text{ m}\Omega \left\{ \begin{array}{l} I_{m\acute{a}x} = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{2}{0.1}} = 4.47 \text{ A} \\ U_{m\acute{a}x} = \sqrt{P \cdot R} = \sqrt{1 \cdot 0.01} = 447.2 \text{ mV} \end{array} \right.$$

Opción	R_P (mΩ)	$\varepsilon(R_P)$	U_p	Alcance	$\varepsilon(U_p)$	U_x	Alcance	$\varepsilon(U_x)$	$\varepsilon(R_x)$
1	100	0.1 %	200 mV	200 mV	0.065 %	50 mV	200 mV	0.11 %	0.275 %
2	100	0.1 %	300 mV	2 V	0.15 %	75 mV	200 mV	0.09 %	0.34 %

De las dos posibles resistencias patrón se elige la resistencia de 100 mΩ por ser la que permite medir R_x con la mejor precisión posible. Se usará el voltímetro digital en alcance de 200 mV para medir la tensión en ambas resistencias. La intensidad del ensayo es de 2 A. La incertidumbre esperada para la resistencia a medir R_x es:

$$\varepsilon(R_x) = 0.275 \%$$

$$R_x = 25 \pm 0.07 \text{ m}\Omega = 25 \text{ m}\Omega \pm 0.275 \%$$

Selección de las fuentes. La intensidad necesaria para llevar a cabo el ensayo es de 2 A. De las distintas fuentes disponibles en el laboratorio, se procede a analizar la más adecuada para el ensayo:

- Se descartan las fuentes de tensión fija de 5 V, por la necesidad de ir regulando la tensión en la resistencia patrón R_p .
- La fuente de intensidad de 7-11 mA también se descarta por ser inferior a 2 A, la intensidad requerida para este ensayo.
- La fuente de tensión regulable de 2x30 V, $I_{m\acute{a}x}=3$ A, $\Delta U=0.2$ V, puede usarse pero tiene poca resolución.
- La fuente de intensidad individual regulable 0-3 A. $U_{m\acute{a}x} = 30$ V; resolución=20 mA, nos proporciona la intensidad del ensayo y en principio presenta mejor resolución en la intensidad.

Calculamos la resolución con ambas fuentes para elegir entre la fuente de tensión y la de intensidad regulable:

$$\Delta U_p^{U_a} = \frac{R_p}{R_x + R_p} \cdot \Delta U = \frac{0.1}{0.025 + 0.1} \cdot 0.2 = 0.16 \text{ V}$$

$$\Delta U_p^{I_a} = R_p \cdot \Delta I = 0.1 \cdot 0.02 = 0.002 \text{ V}$$

Como se observa, la fuente de intensidad regulable presenta mejor resolución en la tensión de la resistencia patrón, por lo que se seleccionará esta fuente.

Lista de aparatos:

Aparatos de Precisión:

- V: Multímetro digital PROMAX PD-183 (20000 cuentas). Como voltímetro: 200mV, 2, 20, 200, 1000V. Resistencia interna: 10 MΩ. Precisión: 0.05 %lect. + 3dígs. en CC.
- R_p : Resistencia (*shunt*): 100 mΩ, 0.1 %, 2W.

Aparatos Auxiliares:

- I_a : Fuente de intensidad individual regulable 0-3 A. $U_{m\acute{a}x} = 30$ V; resolución=20 mA.

Medidas: Tensión medida en la resistencia patrón, $U_p = 199.27$ mV. La incertidumbre en la medida es:

$$\alpha(U_p) = \frac{0.05}{100} \cdot U_p + 3 \cdot 0.01 = \frac{0.05}{100} \cdot 199.27 + 3 \cdot 0.01 = 0.13 \text{ V}$$

$$\varepsilon(U_p) = \frac{\alpha(U_p)}{U_p} \cdot 100 = \frac{0.13}{199.27} \cdot 100 = 0.065 \%$$

Tensión medida en la resistencia a medir, $U_x = 55.52$ mV. La incertidumbre en la medida es:

$$\alpha(U_x) = \frac{0.05}{100} \cdot U_x + 3 \cdot 0.0001 = \frac{0.05}{100} \cdot 55.52 + 3 \cdot 0.01 = 0.06 \text{ V}$$

$$\varepsilon(U_x) = \frac{\alpha(U_x)}{U_x} \cdot 100 = \frac{0.06}{55.52} \cdot 100 = 0.104 \%$$

Resultados: La resistencia medida R_x será:

$$R_x = \frac{U_x}{U_p} \cdot R_p = \frac{55.52}{199.27} \cdot 100 = 27.86 \text{ m}\Omega$$

La incertidumbre en R_x será:

$$\begin{aligned} \varepsilon(R_x) &= \varepsilon(R_p) + \varepsilon(U_x) + \varepsilon(U_p) = \\ &= 0.1 \% + 0.104 \% + 0.065 \% = \\ &= 0.27 \% \end{aligned}$$

La resistencia medida R_x será:

$$R_x = 27.86 \pm 0.08 \text{ m}\Omega = 27.86 \text{ m}\Omega \pm 0.27 \%$$

Conclusiones: Con este método se ha tratado de medir haciendo uso de un voltímetro en paralelo con una resistencia para evitar el uso del amperímetro. El valor obtenido en la medida de la resistencia ha sido de 27.86 mΩ, que es bastante similar a 25 mΩ, no encontrándose sin embargo, el valor dado por el fabricante en el rango de posibles valores.

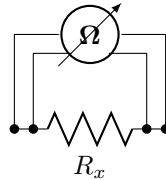
También es importante apreciar que en la medida de resistencias pequeñas es difícil conseguir tensiones cercanas a los alcances mínimos disponibles en los voltímetros, lo que supone una pérdida de precisión en la medida de las tensiones, y por ende, en la de la resistencia a medir. Además, para alcanzar dichas tensiones cercanas al alcance, son necesarias intensidades considerables, que no aguantan todas las resistencias, lo que supone una dificultad adicional a la hora de encontrar una resistencia patrón.

Un último factor a tener en cuenta es la resolución, ya que mientras que con el uso de fuentes de tensión la resolución aumenta poco debido a los pequeños y parecidos valores de las resistencias, es recomendable hacer uso de fuentes de intensidad cuya resolución en la tensión de las resistencias se verá mejorada al ser estas menores que la unidad.

Ensayo 2.2: Medida de una resistencia pequeña con instrumento de lectura directa

Enunciado: Medida de la resistencia de entrada de un transformador de intensidad 10/5 A, 6 VA, clase 0.5, la resistencia del conductor de un cable amperimétrico y voltimétrico y la resistencia de contacto de una conexión a un miliohmímetro.

Esquema de conexión:



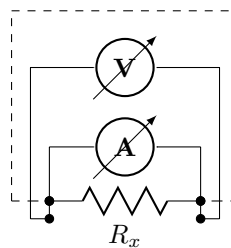
Preparación: Se dispone de dos miliohmímetros de 2000 y 4000 cuentas con distintas precisiones:

Miliohmímetro	Incertidumbre
(2000 cuentas)	0.1 %lect. + 0.25 %alc.
(4000 cuentas)	0.05 %lect. + 0.09 %alc.

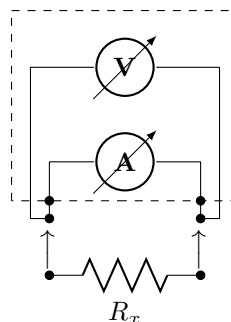
Todas las medidas se realizan de forma directa y a cuatro hilos. La resistencia de entrada del transformador de intensidad se mide con el miliohmímetro de 4000 cuentas en alcance de 40 mΩ.

Con el mismo aparato de medida, se realiza la medida de la resistencia de los conductores amperimétricos y voltimétricos. Para ello, se hace uso de las bornes de conexión del miliohmímetro, atendiendo a la conexión adecuada de los conductores para incluir o eliminar la resistencia de contacto de dichos cables.

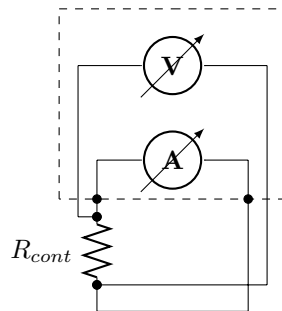
Ensayo sin resistencia de contacto: El ensayo sin resistencia de contacto se consigue conectando la resistencia (conductor) a las bornes de la fuente de intensidad y el voltímetro del aparato entre ambas.



Ensayo con resistencia de contacto: El siguiente ensayo con resistencia de contacto se consigue conectando una bornes del voltímetro a una de las bornes del amperímetro, antes de la resistencia, y después se conecta dicha resistencia entre esta borne y la restante del amperímetro y por último la borne del voltímetro.



Medida de la resistencia de contacto: Para medir la resistencia de contacto R_{cont} , se conecta un borne del voltímetro a la entrada del amperímetro, la R_{cont} , la otra borne del voltímetro y finalmente se cierra el circuito de intensidad conectando la última borne del voltímetro al amperímetro



Lista de aparatos:

Aparatos de Precisión:

- Miliohmímetro (4000 cuentas): $\underline{40}$, 400m Ω , 4, 40, 400 Ω , 4k Ω ; 0.05 % lect.+0.09 % alc.

Medidas:

Resistencia del arrollamiento del transformador de intensidad:

$$R_x = 25.70 \text{ m}\Omega$$

Incertidumbre en la medida:

$$\alpha(R_x) = \frac{0.05}{100} \cdot R_x + \frac{0.09}{100} \cdot alc. = \frac{0.05}{100} \cdot 25.7 + \frac{0.09}{100} \cdot 40 = 0.05 \text{ m}\Omega$$

$$\varepsilon(R_x) = \frac{\alpha(R_x)}{R_x} \cdot 100 = \frac{0.05}{25.7} \cdot 100 = 0.19 \%$$

Medida de las resistencias de un cable amperimétrico:

	R_x (m Ω)	$\alpha(R_x)$ (m Ω)	$\varepsilon(R_x)$ (%)	Medida
R sin contactos	4.88	0.04	0.79 %	$4.88 \pm 0.04 \text{ m}\Omega$, $4.88 \text{ m}\Omega \pm 0.79 \%$
R con contactos	9.15	0.04	0.44 %	$9.15 \pm 0.04 \text{ m}\Omega$, $9.15 \text{ m}\Omega \pm 0.44 \%$
Contacto	1.56	0.04	2.36 %	$1.56 \pm 0.04 \text{ m}\Omega$, $1.56 \text{ m}\Omega \pm 2.36 \%$

Medida de las resistencias de un cable voltimétrico:

	R_x (m Ω)	$\alpha(R_x)$ (m Ω)	$\varepsilon(R_x)$ (%)	Medida
R sin contactos	10.21	0.04	0.40 %	$10.21 \pm 0.04 \text{ m}\Omega$, $10.21 \text{ m}\Omega \pm 0.40 \%$
R con contactos	12.21	0.04	0.34 %	$12.21 \pm 0.04 \text{ m}\Omega$, $12.21 \text{ m}\Omega \pm 0.34 \%$
Contacto	0.9	0.04	4.05 %	$0.9 \pm 0.04 \text{ m}\Omega$, $0.9 \text{ m}\Omega \pm 4.05 \%$

Resultados:

Medida de la resistencia del arrollamiento:

$$R_x = 25.70 \pm 0.05 \text{ m}\Omega = 25.7 \text{ m}\Omega \pm 0.19 \%$$

Medida de las resistencias de un cable amperimétrico:

R_x	Medida
R sin contactos	$4.88 \pm 0.04 \text{ m}\Omega$, $4.88 \text{ m}\Omega \pm 0.79 \%$
R con contactos	$9.15 \pm 0.04 \text{ m}\Omega$, $9.15 \text{ m}\Omega \pm 0.44 \%$
Contacto	$1.56 \pm 0.04 \text{ m}\Omega$, $1.56 \text{ m}\Omega \pm 2.36 \%$

Resistencias de un cable voltimétrico:

R_x	Medida
R sin contactos	$10.21 \pm 0.04 \text{ m}\Omega$, $10.21 \text{ m}\Omega \pm 0.40 \%$
R con contactos	$12.21 \pm 0.04 \text{ m}\Omega$, $12.21 \text{ m}\Omega \pm 0.34 \%$
Contacto	$0.9 \pm 0.04 \text{ m}\Omega$, $0.9 \text{ m}\Omega \pm 4.05 \%$

Conclusiones: Con respecto a la resistencia del transformador, se puede concluir que la medida directa de resistencias proporciona un valor más cercano y fiable que el obtenido por comparación de tensiones, ya que no requiere más aparatos que el de medida, no modifica el circuito (con el consiguiente posible error sistemático a considerar) y, además, es posible la medida a cuatro hilos, que mejora la precisión, ya que permite descontar las resistencias de los cables de los instrumentos.

Con respecto a los cables voltimétricos y amperimétricos, se comprueba que este último presenta menor resistencia, como era de esperar. Además, existe coherencia entre los resultados obtenidos con y sin resistencia de contacto, puesto que la suma de las resistencias sin contacto más la propia del contacto nos da un resultado muy próximo a la resistencia completa del cable.

Se podría mejorar la precisión de ambas medidas con un miliohmímetro con menores alcances, ya que el alcance utilizado (que era el más pequeño posible) se encontraba lejos del valor a medir, lo que conlleva un aumento de la incertidumbre.

Ensayo 2.3: Medida de una resistencia de aislamiento con instrumento de lectura directa

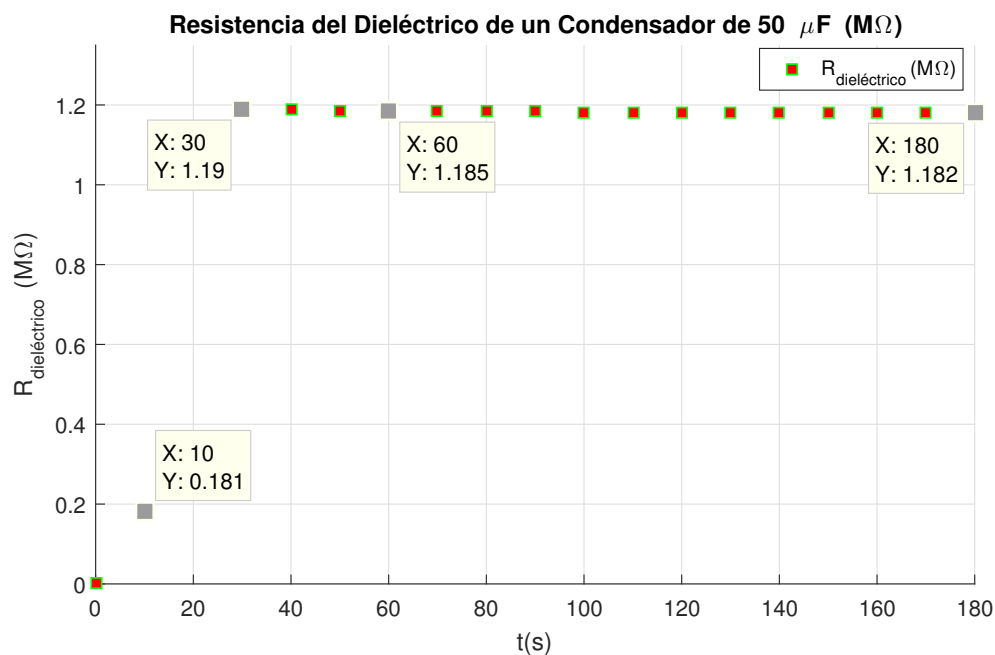
Enunciado: Medida de la resistencia de aislamiento de un cable de audio, y de la resistencia del dieléctrico de un condensador de capacidad $50 \mu F$, con un gigaohmímetro.

Lista de aparatos:

Aparatos de Precisión:

- Gigaohmímetro (4000 cuentas): 4, 40, 400, 4000M Ω ; 3%+5dig (<2G Ω), 5+5dig (>2G Ω).
Tensiones de medida: 250V, 500V y 1000V. Corriente de medida: 1mA.

Medidas:



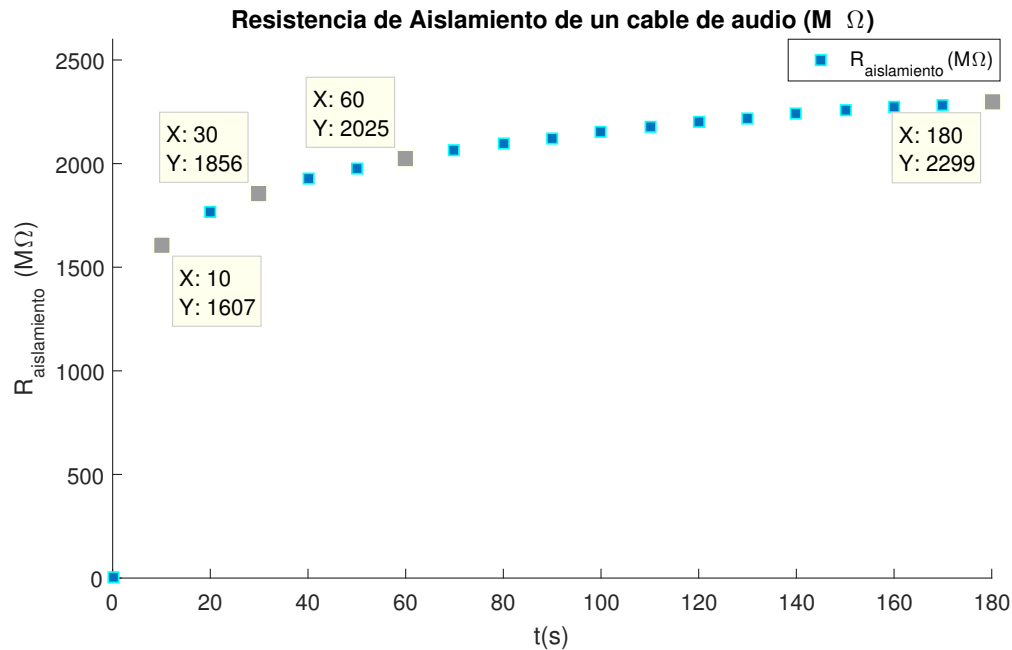
Resultados:

Condensador ($50 \mu F$). Los índices que se han de medir para analizar la calidad y el estado del dieléctrico son el ratio de absorción dieléctrica, DAR y el índice de polarización, PI :

$$DAR = \frac{R(60 s)}{R(30 s)} = \frac{1.185}{1.19} = 0.996$$

Para el cálculo del PI , se supondrá que la resistencia medida a los 10 minutos es igual que la medida a los 3 minutos ya que esta última se mantiene prácticamente constante. Así, se tiene:

$$PI = \frac{R(10 min)}{R(1 min)} = \frac{1.182}{1.185} = 0.998$$

Medidas:Resultados:

Cable de Audio. Los índices que se han de medir para analizar la calidad y el estado del dieléctrico son el ratio de absorción dieléctrica, DAR y el índice de polarización, PI :

$$DAR = \frac{R(60\text{ s})}{R(30\text{ s})} = \frac{2025}{1856} = 1.091$$

Para el cálculo del PI , se supondrá que la resistencia medida a los 10 minutos es igual que la medida a los 3 minutos ya que esta última se mantiene prácticamente constante. Así, se tiene:

$$PI = \frac{R(10\text{ min})}{R(1\text{ min})} = \frac{2299}{2025} = 1.135$$

Conclusiones: Accediendo a la tabla de criterios generalmente aceptados para comparar el estado de los aislamientos que se presenta a continuación:

Estado de aislamiento	Índice	
	DAR	PI
Peligroso	< 1	< 1
Dudoso	1 a 1.25	1 a 2
Bueno	1.4 a 1.6	2 a 4
Excelente	>1.6	>4

Del aislamiento del condensador, se puede concluir, según la tabla, que el aislamiento es de dudosa calidad más cercano a peligroso, que a bueno, ya que tanto el DAR como el PI , están muy cercanos 1.

Del aislamiento del cable de audio, se puede concluir, según la tabla, que el aislamiento del cable es peligroso, y de estado dudoso, con un Dar como el PI , están muy cercanos 1, pero inferiores a la unidad.

Ensayo 2.4: Medida de resistencias de toma de tierra

Enunciado: Medida de las resistencias de toma de tierra con un simulador de tomas de tierra.

Lista de aparatos:

- Telurímetro (2000 cuentas): 20, 200, 2000 Ω ; 1 % lect. + 0.5 % alc.; RV=3M Ω ; Fuente intensidad: $R_o < 40 \text{ k}\Omega$.

Medidas: Se miden, en parejas, las distintas tomas auxiliares, cuyos resultados son:

A4 y A6	R=19.8 Ω
A5 y A4	R=19.8 Ω
A5 y A6	R=21.2 Ω

Se puede observar que la resistencia distinta de las otras dos es la A4, por lo que queda descartada y se hará uso de las tomas A5 y A6. Realizando las medidas a tres hilos se obtienen los siguientes valores de las tomas principales:

$$T_1 = 21.2 \Omega$$

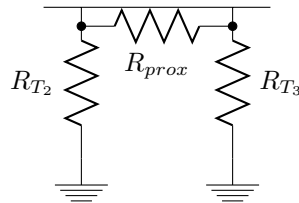
$$T_2 = 19.3 \Omega$$

$$T_3 = 16 \Omega$$

Además, midiendo a las tomas de tierra por parejas, se tiene que :

T_1 y T_2	R=41 Ω
T_1 y T_3	R=37.9 Ω
T_2 y T_3	R=16.3 Ω

Resultados: Se comprueba en la tabla anterior que las conexiones $T_1 - T_2$ y $T_1 - T_3$ son el resultado de la suma de las individuales, pero no así ocurre lo mismo con $T_2 - T_3$ que es mucho menor que la suma de las individuales. Ello se debe a que ambas tierras se encuentran muy próximas por lo que parte de la intensidad no pasa por el punto de tensión cero. esto se representa con una resistencia de proximidad que refleja físicamente la situación:

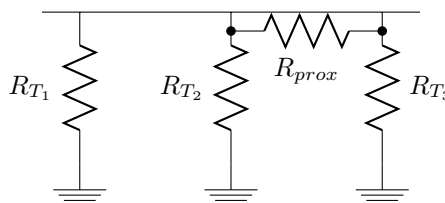


El valor de la resistencia de proximidad se puede obtener despejando del paralelo de las tres resistencias ($R_{prox} // (R_{T_2} + R_{T_3})$), cuyo valor es conocido por ser el que se ha medido:

$$16.3 \Omega = \frac{(R_{T_2} + R_{T_3}) \cdot R_{prox}}{(R_{T_2} + R_{T_3}) + R_{prox}}$$

$$R_{prox} = 30.138 \Omega$$

Por lo que finalmente se tiene:



donde $R_{T_1} = 21.2 \, \Omega$, $R_{T_2} = 19.3 \, \Omega$, $R_{T_3} = 16 \, \Omega$ y $R_{prox} = 30.138 \, \Omega$.

Conclusiones: Del ensayo se puede concluir que la influencia en la medida de la resistencia de proximidad juega un papel muy relevante en la medida de las puestas a tierra, ya que el paralelo de dos resistencias siempre da una resistencia equivalente menor que cualquiera de las dos, y esto supone que se está midiendo una resistencia (la resistencia equivalente) mucho menor a la que en realidad existe, lo que afecta a la precisión de la medida de forma determinante. El efecto de la proximidad a la hora de tomar medidas es un factor que siempre se ha de tener en cuenta.

Práctica n°3: Medida con Osciloscopio

Laboratorio de Instrumentación Eléctrica
4°B, I.E.M

Gonzalo Sánchez Contreras

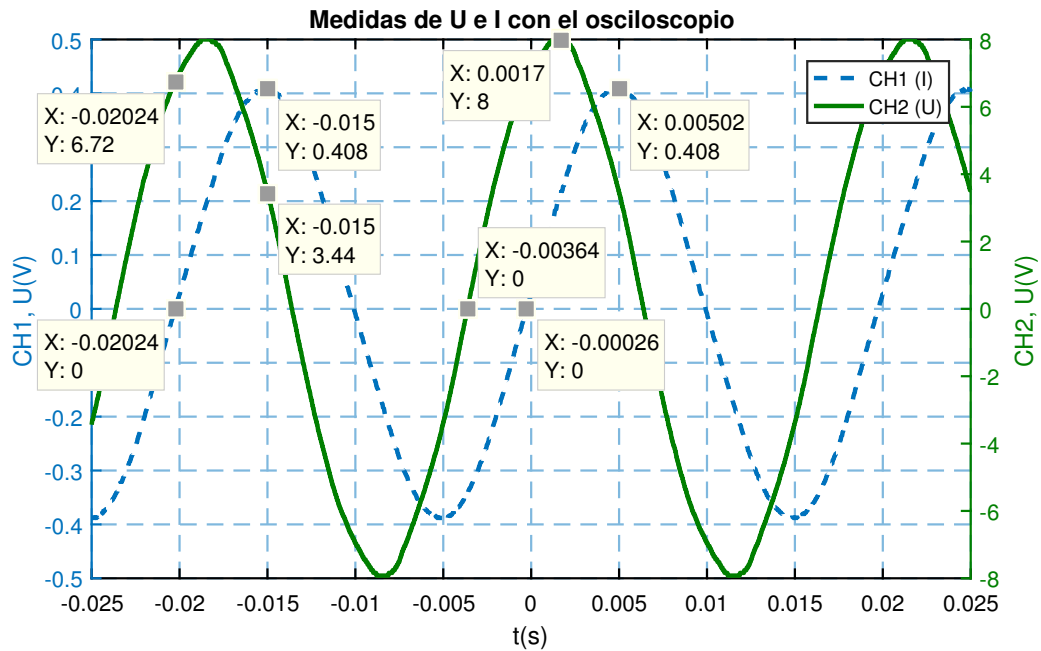
Antonio Rubí Rodríguez

Ignacio Sanz Soriano

17 de octubre de 2016

Ensayo 3.1: Medida de los parámetros de una carga serie R-L

Medidas:



	Osciloscopio				Magnitudes medidas			
	Módulo	Ángulo	P. Real	P. Imag.	Módulo	Ángulo	P. Real	P.Imag.
I	289 mV	0 ms	289 mV	0 mV	0.93 A	0°	0.93 A	0 A
α	10.66 mV	-	16.43 mV	-	0.04 A	-	0.04 A	-
ε	3.70 %	-	5.70 %	-	4.63 %	-	4.63 %	-
U	5.66 V	-3.38 ms	2.60 V	4.75 V	113.2 V	60.84°	52 V	95 V
α	0.20 V	0.10 ms	0.18 V	0.20 V	5.11 V	1.81°	3.85 V	4.503 V
ε	3.51 %	2.97 %	6.74 %	4.14 %	4.51 %	2.97 %	7.4 %	4.74 %

Tensiones e intensidades en fase y cuadratura:

	Fase	Cuadratura
Intensidad (A)	$I_f = 0.93 \text{ A}$	$I_q = 0 \text{ A}$
Tensión (V)	$U_f = 52 \text{ V}$	$U_q = 95 \text{ V}$

Las componentes de la intensidad en módulo y en ángulo son:

$$\bar{I} = I / \varphi^\circ = 0.93 / 0^\circ \text{ A}$$

Las componentes de la tensión en módulo y en ángulo son:

$$\bar{U} = U / \varphi^\circ = 113.2 / 60.84^\circ \text{ V}$$

Resultados:

Forma polar. Para la medida de la impedancia en forma polar, la impedancia medida (\bar{Z}) en el ensayo es:

$$\bar{Z} = \frac{\bar{U}}{\bar{I}} = \frac{113.2/60.84^\circ}{0.93/0^\circ} = 121.72/60.84^\circ \Omega$$

La incertidumbre en la medida de la impedancia es:

$$\begin{aligned}\varepsilon(Z) &= \varepsilon(U) + \varepsilon(I) = 4.51 \% + 4.63 \% = 9.14 \% \\ \varepsilon(\varphi) &= 2.97 \%\end{aligned}$$

La medida de la impedancia \bar{Z} es:

$$\bar{Z} = 121.72 \Omega \pm 9.14 \% / 60.84^\circ \pm 2.97 \%$$

Forma cartesiana. Para la medida de la impedancia en forma cartesiana (donde los subíndices 'R' e 'I' denotan la componente real e imaginaria del fasor respectivamente), la impedancia medida (\bar{Z}) en el ensayo es:

$$\begin{aligned}\bar{Z} &= Z_R + j \cdot Z_I \\ \bar{Z} = \frac{\bar{U}}{\bar{I}} &= \frac{U_R}{I_R} + j \cdot \frac{U_I}{I_R} = \frac{52 + j \cdot 95}{0.93 + j \cdot 0} = \frac{52}{0.93} + j \cdot \frac{95}{0.93} = 55.91 + j \cdot 102.15 \Omega\end{aligned}$$

La incertidumbre en la medida de la impedancia es (forma rectangular):

$$\begin{aligned}\varepsilon(Z_R) &= \varepsilon(U_R) + \varepsilon(I_R) = 7.4 \% + 4.63 \% = 12.03 \% \\ \varepsilon(Z_I) &= \varepsilon(U_I) + \varepsilon(I_R) = 4.74 \% + 4.63 \% = 9.37 \%\end{aligned}$$

La medida de la impedancia \bar{Z} es:

$$\bar{Z} = (55.91 \pm 6.73) + j \cdot (102.15 \pm 9.57) \Omega = (55.91 \Omega \pm 12.03 \%) + j \cdot (102.15 \Omega \pm 9.37 \%)$$

A continuación, se pasa de forma polar a forma cartesiana a fin de comparar, las dos medidas, en cartesianas con procedencias distintas:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{teórica} &= 60.5 + j \cdot 96.8 \Omega \\ \bar{Z}_{Polar} &= 121.72/60.84^\circ \Omega = 59.30 + j \cdot 106.92 \Omega \\ \bar{Z}_{Cartesiana} &= 55.91 + j \cdot 102.15 \Omega\end{aligned}$$

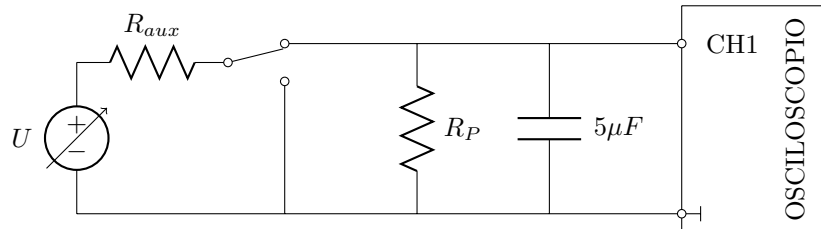
Conclusiones: Por un lado se observa que el osciloscopio no presenta buena precisión en las medidas de tensión, ya que las incertidumbres de medida son considerables. Por otro lado, el ángulo de la impedancia cuando esta es medida en forma polar presenta una precisión mucho mejor, lo que implica que la precisión en la medida de tiempos del osciloscopio es comparativamente bastante mejor que la precisión en la medida de tensiones.

Se puede pasar la forma polar a cartesiana para comprobar el valor de la resistencia y la reactancia, y compararlos con la forma cartesiana medida directamente del osciloscopio. Se comprueba que los valores obtenidos en forma polar y pasados posteriormente a forma cartesiana son más cercanos a los valores teóricos de la parte real de la impedancia pero más lejanos a los valores teóricos de la parte imaginaria de la impedancia. Existe un compromiso entre una mejor precisión en la medida de la parte resistiva de la impedancia o una mejor precisión en la parte inductiva de la misma, en función de que método de medida se escoja.

Ensayo 3.2: Medida de la capacidad de un condensador

Enunciado: Medida de la capacidad de un condensador de $5 \mu\text{F}$ mediante osciloscopio.

Esquema:



Preparación:

Tensión inicial (U_o) : Para escoger la tensión inicial del ensayo (U_o) es importante en cuenta que el alcance del osciloscopio ha de ser de 1 V/div , por lo que se podrán medir como máximo 8 V , ya que se tienen 8 divisiones en el eje vertical. Para medir con la máxima precisión posible, se deberá conseguir una tensión inicial lo más cercana posible a 8 V en el condensador, utilizando la fuente de tensión regulable $0\text{-}30 \text{ V}$, puesto que la fuente de tensión fija de 5 V no es suficiente.

Resistencia patrón (R_p) : La constante de tiempo del condensador (τ) debe ser de 40 ms , por lo que se escogerá la siguiente resistencia patrón (R_p):

$$\tau = R_p \cdot C \rightarrow R_p = \frac{\tau}{C} = \frac{40 \text{ ms}}{5 \mu\text{F}} = 8 \text{ k}\Omega$$

Resistencia de protección (R) : Para realizar la carga y la descarga se utilizará un conmutador que permite aislar el condensador para su descarga y volver a cargarlo con la fuente en la otra posición. Al cambiar el conmutador a la posición de descarga, la fuente queda cortocircuitada, por lo que se debe incluir una resistencia R de $1 \text{ k}\Omega$ que la proteja. La intensidad en este caso será de 8 mA , mucho menor que la intensidad máxima de la fuente.

Alcance de tiempo: Respecto al alcance de tiempo, se considerará que el condensador esta totalmente descargado en 5τ (en realidad, lo está al 95%), es decir, en un tiempo de unos 200 ms . Para este tiempo y con 10 divisiones en el eje horizontal se escogerá un alcance de tiempos de :

$$\frac{200 \text{ ms}}{10 \text{ div}} = 20 \text{ ms/div}$$

como no se dispone de este alcance, se escoge el inmediatamente superior, 25 ms/div .

Restricciones del tiempo y la tensión de medida: Se especifica que la tensión final de medida no ha de ser inferior a un 25% de la tensión inicial y que el tiempo de medida no ha de ser inferior al de una constante de tiempo. Se calculan a continuación los valores correspondientes al tiempo para la tensión límite dada y a la tensión para un tiempo de 40 ms , correspondiente a una constante de tiempo (τ). El tiempo en el que se alcanza una tensión del 25% de la inicial se obtiene de la ecuación de descarga de un condensador inicialmente cargado a U_o y que se descargará totalmente ($U_\infty = 0 \text{ V}$):

$$U(t) = U_o \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$t^* = -\ln\left(\frac{U(t=t^*)}{U_o}\right) \cdot \tau = -\ln\left(\frac{1}{4}\right) \cdot 40 \text{ ms} = 55.45 \text{ ms}$$

por lo que a partir de dicho tiempo no se podrán medir valores de tensión, como especifica el enunciado. La tensión para la que ha transcurrido una constante de tiempo es:

$$U(t = \tau) = U_o \cdot e^{-\frac{\tau}{\tau}} = U_o \cdot e^{-1} = 0.37 \cdot U_o$$

por lo que se habrá de medir una tensión menor que la anterior y mayor de la que corresponda al tiempo de 55.45 ms.

Lista de aparatos:

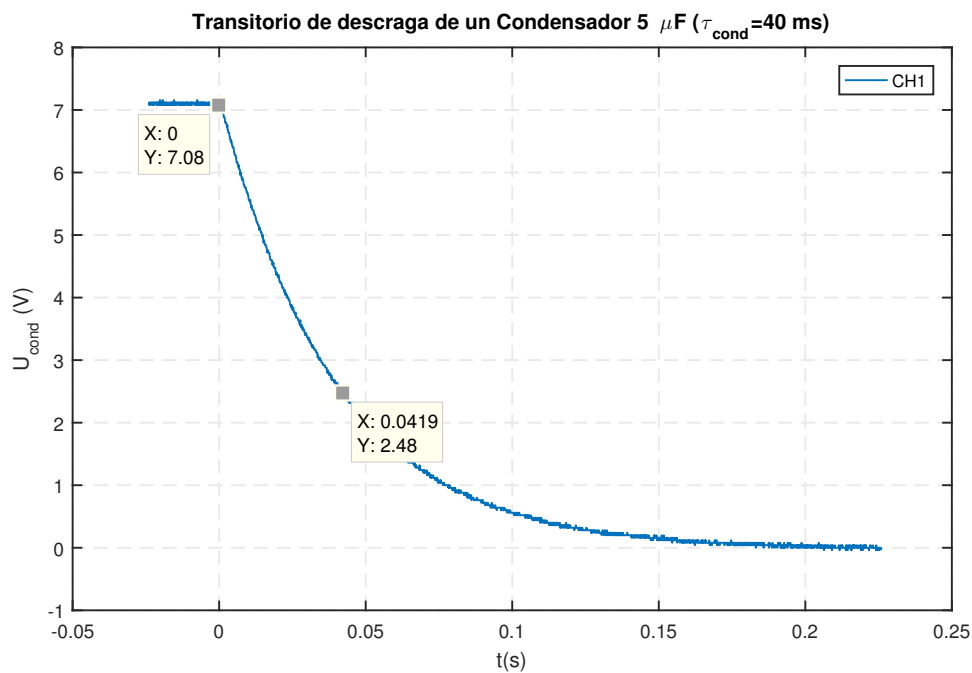
Aparatos de Precisión:

- U : Fuente de tensión continua: 2x30V. Para cada fuente: $I_{m\acute{a}x} = 3A$; resolución: 0.2V.
- Osciloscopio TDS1002C-EDU (2500 muestras):
 Alcances tiempo: (5-10-25-50-100-250-500)ns/div-(1-2.5-5-10-25-50-100-250-500) μ s/div-(1-2.5-5-10-25-50-100-250-500)ms/div. Precisión (si amplitud mayor de 5div): 1muestra + 100ppm medida + 0.4ns.
 Alcances tensión: (5-10-20-50-100-200-500)mV/div-(1-2-5)V/div. Precisión (si alcance mayor de 5mV/div): 3 % medida + 0.1div + 1mV.
 Eje vertical: 8 div.
 Eje horizontal: 10 div.
 Impedancia de entrada: $1M\Omega(\pm 2\%)$ en paralelo con $20pF(\pm 3pF)$.

Aparatos de Auxiliares:

- R_{aux} : Caja de resistencias 2x(0.1, 1, 10 y 100) k Ω Clase 0.1, 0.25W.

Medidas:



Tensión inicial y tiempo de medida:

$$t_o = 0s \rightarrow U_o(t = t_o) = 7.12 V;$$

Tensión medida en tiempo $t = t^*$:

$$t^* = 0.0419s \rightarrow U_f(t = t^*) = 2.48 V;$$

Se comprueba que el intervalo de tiempo es superior a una constante de tiempo (τ) del condensador:

$$\Delta t = t^* - t_o = 0.0419 - 0 = 41.9 ms$$

Resultados: A continuación, se calculan las incertidumbres en las medidas de las tensiones, los tiempos y las resistencias. Las incertidumbres en las medidas de tensión son:

$$\alpha(U_o) = 3\% \cdot medida + 0.1 \cdot div + 1 \cdot 10^{-3} = \frac{3}{100} \cdot 7.08 + 0.1 \cdot 1 + 1 \cdot 10^{-3} = 0.3134 V$$

$$\alpha(U_f) = 3\% \cdot medida + 0.1 \cdot div + 1 \cdot 10^{-3} = \frac{3}{100} \cdot 2.48 + 0.1 \cdot 1 + 1 \cdot 10^{-3} = 0.1754 V$$

La incertidumbre en la medida de la resistencia patrón (R_p) es:

$$\alpha(R_p) = 0.1\% \cdot R = \frac{0.1}{1000} \cdot 8000 = 8 \Omega$$

La incertidumbre en la medida del tiempo es:

$$\alpha(\Delta t) = 1 \text{ muestra} + 100 \text{ ppm} \cdot medida + 0.4 \text{ ns} =$$

$$= 1 \cdot \frac{50 \cdot 10}{2500} + \frac{100}{1 \cdot 10^6} \cdot 41.9 + 0.4 \cdot 10^{-6} = 0.2053 \text{ ms}$$

Ahora se calcula el valor de la capacidad del condensador (C_x) y la incertidumbre en la medida, sabiendo que esta es función de la tensión, la resistencia patrón y el tiempo.

$$C_x = \frac{\Delta t}{R \cdot \ln\left(\frac{U_o}{U_f}\right)} = \frac{41.9}{8 \cdot \ln\left(\frac{7.12}{2.48}\right)} = 4.993 \mu F$$

Haciendo uso de la aproximación de las derivadas parciales se obtiene la incertidumbre absoluta como:

$$\alpha(C_x) = \left| \frac{\partial C_x}{\partial t} \right| \cdot \alpha(t) + \left| \frac{\partial C_x}{\partial U} \right| \cdot \alpha(U) + \left| \frac{\partial C_x}{\partial R} \right| \cdot \alpha(R) + \left| \frac{\partial C_x}{\partial U_o} \right| \cdot \alpha(U_o)$$

$$\frac{\partial C_x}{\partial t} = \frac{-1}{R_p \cdot \ln\left(\frac{U_f}{U_o}\right)} = 9.537 \cdot 10^{-5} F/s$$

$$\frac{\partial C_x}{\partial R} = \frac{t}{R_p^2 \cdot \ln\left(\frac{U_f}{U_o}\right)} = -6.307 \cdot 10^{-10} F/\Omega$$

$$\frac{\partial C_x}{\partial U_f} = \frac{t}{R_p \cdot U_f \cdot \left[\ln\left(\frac{U_f}{U_o}\right) \right]^2} = 2 \cdot 10^{-6} F/V$$

$$\frac{\partial C_x}{\partial U_o} = \frac{-t}{R_p \cdot U_o \cdot \left[\ln\left(\frac{U_f}{U_o}\right) \right]^2} = -5.4 \cdot 10^{-7} F/V$$

Finalmente, se tiene que la incertidumbre absoluta de la medida es:

$$\alpha(C_x) = 0.154 \mu F$$

La incertidumbre relativa en la medida del condensador por lo tanto será:

$$\varepsilon(C_x) = \frac{\alpha(C_x)}{C_x} \cdot 100 = \frac{0.154}{5.045} \cdot 100 = 3.05\%$$

La medida de la capacidad es:

$$C_x = 4.993 \pm 0.152 \mu F = 4.993 \mu F \pm 3.05\%$$

Conclusiones: El valor del condensador medido es cercano al valor esperado (5uF) pero tiene una incertidumbre un poco alta debido principalmente a la precisión del osciloscopio, que para valores pequeños no proporciona una incertidumbre baja y consigue, por tanto, una precisión peor. No obstante, al tratarse de un condensador tan pequeño, esta incertidumbre apenas tiene un efecto apreciable en el circuito salvo para la constante de tiempo de descarga, que se ve bastante afectada por dicha incertidumbre, desviándose de los 40 ms esperados.

Práctica nº4: Calibración de Transformadores de Medida

Laboratorio de Instrumentación Eléctrica
4ºB, I.E.M

Gonzalo Sánchez Contreras

Antonio Rubí Rodríguez

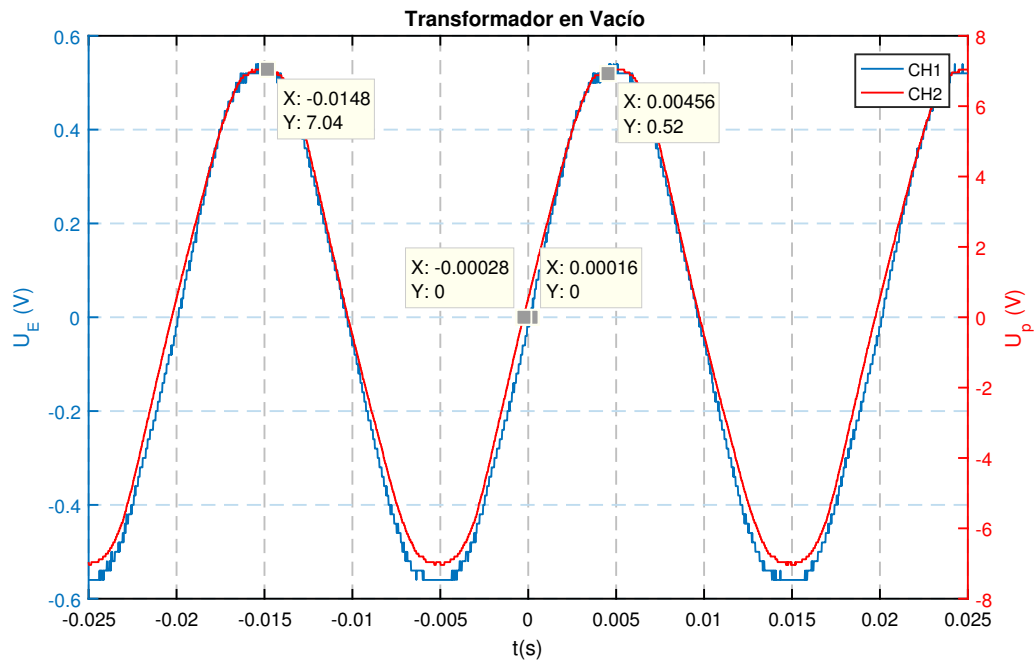
Ignacio Sanz Soriano

31 de octubre de 2016

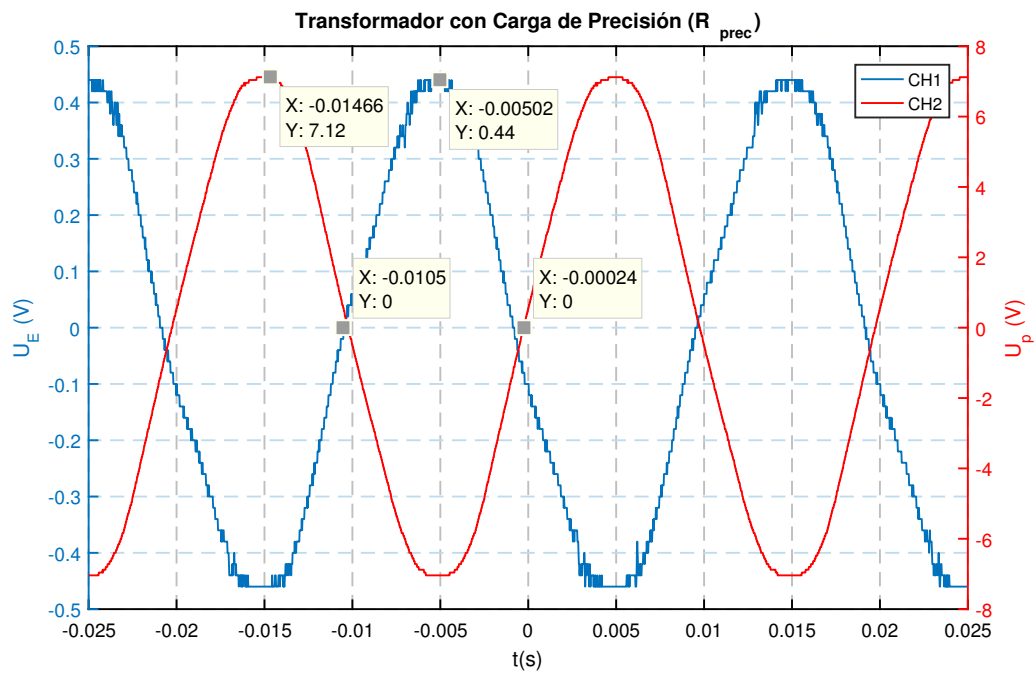
Ensayo 4.1: Calibración de un Transformador de Tensión

Medidas:

Ensayo en vacío:



Ensayo en carga:



Resultados:

1. **Ensayo en vacío.** Los valores eficaces de los fasores \bar{U}_E y \bar{U}_x valen:

$$U_E = \frac{U_{E,pico}}{\sqrt{2}} = \frac{0.52}{\sqrt{2}} = 0.368 \text{ V}$$

$$U_x = \frac{U_{x,pico}}{\sqrt{2}} = \frac{7.04}{\sqrt{2}} = 4.978 \text{ V}$$

El ángulo del fasor \bar{U}_E vale:

$$\varphi_E(^{\circ}) = \frac{\Delta t}{T} \cdot 360 = \frac{0.16 - (-0.28)}{20} \cdot 360 = 7.92^{\circ}$$

El valor de la tensión en vacío en bornas del transformador es:

$$U_x = U_x^{oscilo} \cdot 20 = 4.978 \cdot 20 = 99.56 \text{ V}$$

Las componentes del fasor \bar{U}_E en fase ($U_{E,F}$) y en cuadratura ($U_{E,Q}$) son:

$$\bar{U}_E = U_E \angle \varphi_E = U_{E,F} + j \cdot U_{E,Q} = 0.365 + j \cdot 0.051$$

El error de relación será:

$$\varepsilon_{rel}(\%) = \frac{U_{E,F}}{U_x} \cdot 100 = \frac{0.365}{99.56} \cdot 100 = 0.37 \%$$

El error de ángulo será:

$$\delta(rad) = \frac{U_{E,Q}}{U_x} = \frac{0.051}{99.56} = 0.05 \text{ crad}$$

2. **Ensayo en carga.** El ángulo del fasor \bar{U}_E vale:

$$\varphi_E(^{\circ}) = \frac{\Delta t}{T} \cdot 360 = \frac{0.24 - (-10.5)}{20} \cdot 360 = 183.96^{\circ}$$

Los valores eficaces de los fasores \bar{U}_E y \bar{U}_x valen:

$$U_E = \frac{U_{E,pico}}{\sqrt{2}} = \frac{0.44}{\sqrt{2}} = 0.31 \text{ V}$$

$$U_x = \frac{U_{x,pico}}{\sqrt{2}} = \frac{7.12}{\sqrt{2}} = 5.03 \text{ V}$$

El valor de la tensión en carga en bornas de la resistencia de precisión es:

$$U_x = U_x^{oscilo} \cdot 20 = 5.03 \cdot 20 = 100.68 \text{ V}$$

Las componentes del fasor \bar{U}_E en fase ($U_{E,F}$) y en cuadratura ($U_{E,Q}$) son:

$$\bar{U}_E = U_E \angle \varphi_E = U_{E,F} + j \cdot U_{E,Q} = 0.31 + j \cdot 0.0215$$

El error de relación será:

$$\varepsilon_{rel}(\%) = \frac{U_{E,F}}{U_x} \cdot 100 = \frac{0.31}{100.68} \cdot 100 = 0.31 \%$$

El error de ángulo será:

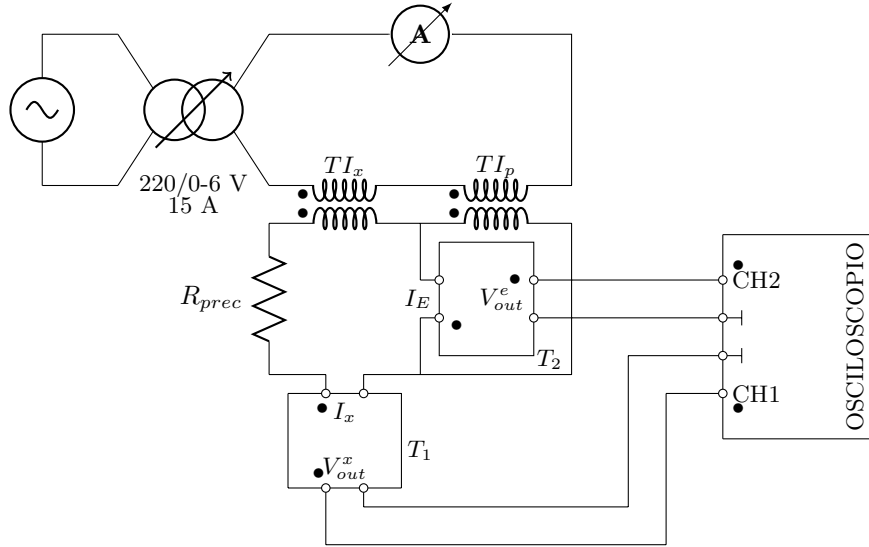
$$\delta(rad) = \frac{U_{E,Q}}{U_x} = \frac{0.0215}{100.68} = 0.06 \text{ crad}$$

Conclusiones: Tanto en el ensayo de carga como el ensayo de precisión, se verifica que el transformador cumple con su clase tanto para tensión como para desfase. No se tiene en cuenta la incertidumbre que introducen los aparatos de medida pues ésta es muy pequeña en comparación y no afecta para el cálculo de error de relación ni de error de ángulo.

Ensayo 4.2: Calibración de un Transformador de Intensidad

Enunciado: Calibración de un transformador de intensidad de relación 15/5 A, clase 3, $S_{prec} = 2.5$ VA.

Esquema:



Preparación:

Resistencia de Precisión (R_{prec}). En primer lugar se ha de calcular la máxima resistencia de precisión (R_{prec}) que puede tener el transformador a ensayar (T_x) a la salida. Para ello, haciendo uso de la potencia de precisión, se tiene que:

$$R = \frac{S_{prec}}{I^2} = \frac{2.5}{5^2} = 0.1 \Omega \leq R_{prec}$$

De la resistencias disponibles se puede escoger la de 0.1Ω , pero el valor de ésta es el mismo que el límite posible para la R_{prec} , por lo que se decide hacer un paralelo entre dos resistencias de 0.1Ω y 0.2Ω , para obtener una resistencia menor que cualquiera de las dos y así asegurar que la resistencia a la salida del transformador de intensidad es menor que la de precisión:

$$R = (R_1 \parallel R_2) = (0.1 \parallel 0.2) \Omega = \frac{0.1 \cdot 0.2}{0.1 + 0.2} = 0.067 \Omega$$

Selección del transformador de intensidad patrón (T_p). A continuación, se escoge el transformador de intensidad patrón (T_p), de entre los dos disponibles:

Transformador patrón (T_p)	Clase	S_{prec}/R_{prec}
Transformador de medida de intensidad: 15/5A	0.5	$R_0 < 0.2 \Omega$
Transformador de medida de intensidad: 15/5A	0.5	10 VA, 0.4Ω

Ambos transformadores presentan la misma precisión, por lo que es indiferente cual elegir para realizar el ensayo, ambos son válidos. Se escogerá el de 10 VA.

Alimentación. Se utilizará la red trifásica de 220 V y el VARIAC 220 V/0-6 V, 15 A, que proporciona la intensidad necesaria a la salida, además de aislamiento galvánico, por lo que no será necesario utilizar transformador de potencia entre la red y los aparatos del ensayo. Por último, se comprueba que para la intensidad máxima del ensayo y de la salida (15 A), no se supera la tensión máxima que puede proporcionar el VARIAC a la salida (6 V).

$$V_{cc}^{T_x} + V_{cc}^{T_p} = 0.2 V + 0.5 V = 0.7 V \leq 6 V$$

Selección de Alcances en el Osciloscopio e Incertidumbre Esperada. Se han de elegir los alcances más adecuados para medir con la mejor precisión posible en el osciloscopio, para cada una de las intensidades del ensayo. Se supondrá que la intensidad error a medir es del 3% de la patrón, para que el transformador cumpla con su clase. Además, como no hay limitación en el desfase angular (δ), se supondrá que la intensidad error en cuadratura ($I_{E,Q}$) es igual a la de fase en el peor de los casos ($I_{E,Q} \leq I_{E,F}$).

1. Intensidad de ensayo de 3 A ($0.2 \cdot I_n$). Se ha de escoger cual es el transductor de corriente más adecuado para cada una de las dos intensidades a medir (I_x y I_E) y sus respectivos alcances en el osciloscopio, en tanto que nos permitan medir con la mejor precisión posible.

- Alcance para la intensidad patrón (I_x) en el Canal 1 (CH_I), de valor 1 A:

Trans. (I_{pn})	I_x (A)	$V_{out} = 0.625 \cdot \frac{I_x}{I_{pn}}$ (mV)	$U_{pico-pico}$ (mV)	$U(mV/div)$	Alcance Osc.
$I_{pn} = 2$ A	1	312.5	883.88	110	200 mV/div
$I_{pn} = 6$ A	1	104	294.15	36.76	50 mV/div

- Alcance para la intensidad error (I_E) en el Canal 2 (CH_{II}), de valor 42.4 mA:

Trans. (I_{pn})	I_E (A)	$V_{out} = 0.625 \cdot \frac{I_x}{I_{pn}}$ (mV)	$U_{pico-pico}$ (mV)	$U(mV/div)$	Alcance Osc.
$I_{pn} = 2$ A	42.4	13.25	37.48	4.68	5 mV/div
$I_{pn} = 6$ A	42.4	3.125	4.42 mV	1.56	5 mV/div

A la vista de los valores de tensiones esperados de entrada al osciloscopio, y su correspondiente alcance, se escogerán aquellas combinaciones que arrojen unas tensiones lo más cercanas posibles al alcance en mV/div del osciloscopio. Así, se tiene que:

	Transductor (I_{pn})	Alcance (mV/div)
$CH_I, I_x = 1$ A	6 A	50 mV/div
$CH_{II}, I_E = 42.4$ mA	2 A	5 mV/div

2. Intensidad de ensayo de 15 A (I_n). Se ha de escoger cual es el transductor de corriente más adecuado para cada una de las dos intensidades a medir (I_x y I_E) y sus respectivos alcances en el osciloscopio, en tanto que nos permitan medir con la mejor precisión posible.

- Alcance para la intensidad patrón (I_x) en el Canal 1 (CH_I), de valor 15 A:

Trans. (I_{pn})	I_x (A)	$V_{out} = 0.625 \cdot \frac{I_x}{I_{pn}}$ (V)	$U_{pico-pico}$ (V)	$U(mV/div)$	Alcance Osc.
$I_{pn} = 6$ A	5	0.52	1.47	184.14	200 mV/div

- Alcance para la intensidad error (I_E) en el Canal 2 (CH_{II}), de valor 42.4 mA:

Trans. (I_{pn})	I_E (A)	$V_{out} = 0.625 \cdot \frac{I_x}{I_{pn}}$ (mV)	$U_{pico-pico}$ (mV)	$U(mV/div)$	Alcance Osc.
$I_{pn} = 2$ A	212.32	66.35	187.67	23.46	50 mV/div
$I_{pn} = 6$ A	212.32	22.12	62.56	7.82	10 mV/div

A la vista de los valores de tensiones esperados de entrada al osciloscopio, y su correspondiente alcance, se escogerán aquellas combinaciones que arrojen unas tensiones los más cercanas posibles al alcance en mV/div del osciloscopio. Así, se tiene que:

	Transductor (I_{pn})	Alcance (mV/div)
$CH_I, I_x = 5 \text{ A}$	6 A	200 mV/div
$CH_{II}, I_E = 212.32 \text{ mA}$	2 A	50 mV/div

Lista de Aparatos:

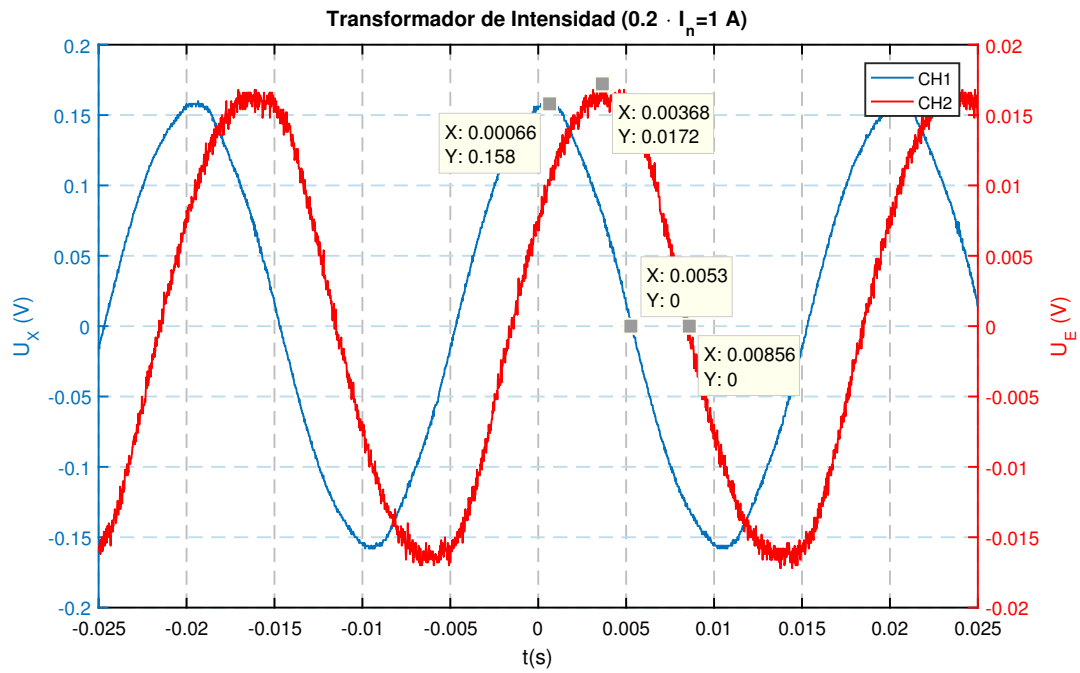
Precisión:

- Osciloscopio TDS1002C-EDU (2500 muestras):
 Alcances tiempo: (5-10-25-50-100-250-500)ns/div-(1-2.5-5-10-25-50-100-250-500) μ s/div-(1-2.5-5-10-25-50-100-250-500)ms/div. Precisión (si amplitud mayor de 5div): 1muestra + 100ppm medida + 0.4ns.
 Alcances tensión: (5-10-20-50-100-200-500)mV/div-(1-2-5)V/div. Precisión (si alcance mayor de 5mV/div): 3% medida + 0.1div + 1mV.
 Eje vertical: 8 div.
 Eje horizontal: 10 div.
 Impedancia de entrada: $1\text{M}\Omega(\pm 2\%)$ en paralelo con $20\text{pF}(\pm 3\text{pF})$.
- T_1 : Transductor de corriente: $I_{pn}=6\text{A(rms)}$; V_{out} (diferencial)= $0.625(I_p/I_{pn})$. precisión: 0.5 %medida + 0.2 % I_{pn} . $R_{int}=15\text{m}\Omega$.
- T_2 : Transductor de corriente: $I_{pn}=2\text{A(rms)}$; V_{out} (diferencial)= $0.625(I_p/I_{pn})$. precisión: 0.5 %medida + 0.2 % I_{pn} . $R_{int}=15\text{m}\Omega$.
- Transformador patrón (T_p) de medida de intensidad: 15/5A; clase 0.5; 10VA.

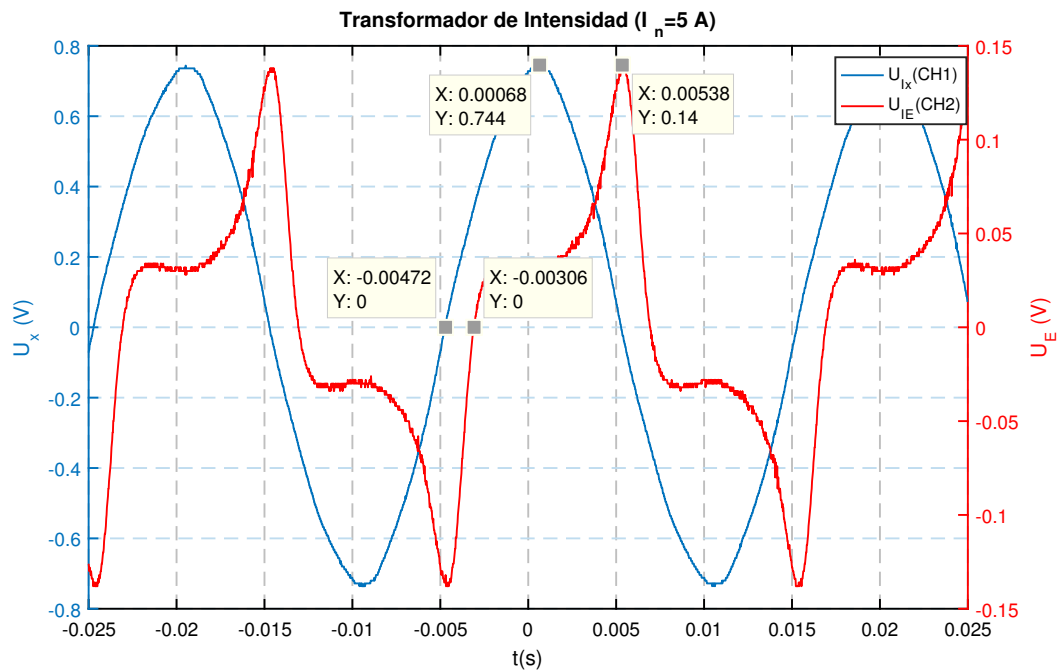
Auxiliares:

- Autotransformador VARIAC 220V/0-6V; 15A; resolución para entrada 220V: 20mV.
- R_{prec} : Resistencias: 0.1 Ω , 0.2 Ω ; 5A.
- A: Pinza amperimétrica (2000 cuentas, CA): 20A, 200A (1.5 %lect. + 4dígitos), 700A (3.5 %lect. + 5dígitos).

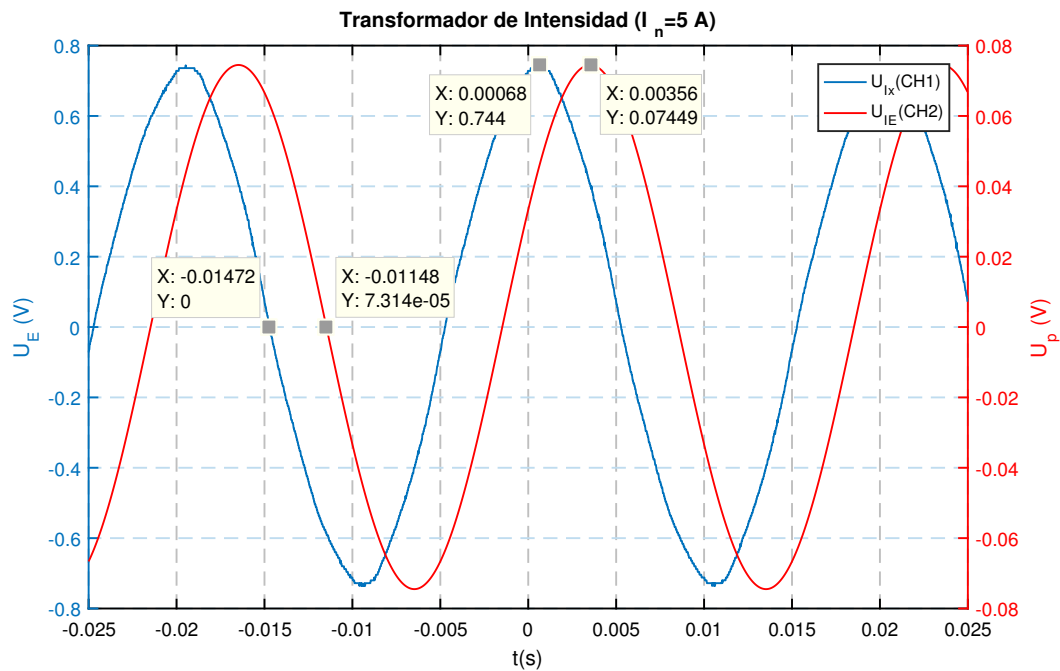
Medidas: Para el ensayo al 20 % de la intensidad nominal (I_n), se han obtenido las siguientes medidas en el osciloscopio:



Para el ensayo a la intensidad nominal I_n , se han obtenido las siguientes medidas en el osciloscopio:



Para eliminar el alto contenido en armónicos se ha aplicado un filtro paso bajo con la finalidad de obtener únicamente el armónico fundamental, y hacer una comparativa entre ambas corrientes, por lo que finalmente se tiene:



El valor de pico del primer armónico de la intensidad de corriente (I_E) tiene un valor de pico más cercano al esperado.

Resultados:

1. **Ensayo de 3 A.** Para el ensayo a $0.2I_n$, el valor del módulo y el ángulo del fasor medido \bar{I}_E en CH_I :

$$I_{E,pico} = I_{pn} \cdot \frac{U_E}{0.625} = 2 \cdot \frac{0.0172}{0.625} = 0.055 \text{ A}$$

$$I_E = \frac{I_{E,pico}}{\sqrt{2}} = 0.039 \text{ A}$$

$$\varphi_E(^{\circ}) = \frac{\Delta t}{T} \cdot 360^{\circ} = \frac{8.6 - 5.3}{20} \cdot 360 = 59.4^{\circ}$$

El valor del módulo del fasor medido \bar{I}_x en CH_{II} :

$$I_{x,pico} = I_{pn} \frac{U_E}{0.625} = 6 \cdot \frac{0.158}{0.625} = 1.517 \text{ A}$$

$$I_x = \frac{I_{x,pico}}{\sqrt{2}} = \frac{1.517}{\sqrt{2}} = 1.073 \text{ A}$$

Los valores de los fasores por lo tanto serán:

$$\bar{I}_x = 1.017 \text{ A}$$

$$\bar{I}_E = I_E / \varphi_E = I_{F,E} + j \cdot I_{E,Q} = I_E \cdot \cos(\varphi_E) + j \cdot I_E \cdot \sin(\varphi_E) = 0.02 + j \cdot 0.034 \text{ A}$$

Finalmente, el error de relación será en la intensidad:

$$\varepsilon_{rel}(\%) = \frac{I_{E,F}}{I_E} \cdot 100 = \frac{0.02}{1.017} \cdot 100 = 1.97\%$$

El error de ángulo será en la intensidad

$$\delta(rad) = \frac{I_{E,Q}}{I_E} = \frac{0.034}{1.017} = 3 \text{ crad}$$

2. **Ensayo de 15 A.** Para el ensayo a I_n , el valor del módulo y el ángulo del fasor medido \bar{I}_E en CH_I :

$$I_{E,pico} = I_{pn} \cdot \frac{U_E}{0.625} = 2 \cdot \frac{0.14}{0.625} = 0.448 \text{ A (sin filtro)}$$

$$I_E = \frac{I_{E,pico}}{\sqrt{2}} = 0.32 \text{ A}$$

$$I_{E,pico} = I_{pn} \cdot \frac{U_E}{0.625} = 2 \cdot \frac{0.0744}{0.625} = 0.24 \text{ A (filtrado)}$$

$$I_E = \frac{I_{E,pico}}{\sqrt{2}} = 0.17 \text{ A}$$

$$\varphi_E(^{\circ}) = \frac{\Delta t}{T} \cdot 360^{\circ} = \frac{4.72 - 3.06}{20} \cdot 360 = 29.9^{\circ} \text{ (sin filtro)}$$

$$\varphi_E(^{\circ}) = \frac{\Delta t}{T} \cdot 360^{\circ} = \frac{14.72 - 11.48}{20} \cdot 360 = 58.32^{\circ} \text{ (filtrado)}$$

El valor del módulo del fasor medido \bar{I}_x en CH_{II} :

$$I_{x,pico} = I_{pn} \cdot \frac{U_E}{0.625} = 6 \cdot \frac{0.744}{0.625} = 7.14 \text{ A}$$

$$I_x = \frac{I_{x,pico}}{\sqrt{2}} = 5.05 \text{ A}$$

Los valores de los fasores en fase y cuadratura por lo tanto serán:

$$\bar{I}_x = 5.05 \text{ A}$$

$$\bar{I}_E = I_E \angle \varphi_E = I_{F,E} + j \cdot I_{E,Q} = I_E \cdot \cos(\varphi_E) + j \cdot I_E \cdot \sin(\varphi_E) = 0.277 + j \cdot 0.16 \text{ A (sin filtrar)}$$

$$\bar{I}_E = I_E \angle \varphi_E = I_{F,E} + j \cdot I_{E,Q} = I_E \cdot \cos(\varphi_E) + j \cdot I_E \cdot \sin(\varphi_E) = 0.089 + j \cdot 0.145 \text{ A (filtrado)}$$

Finalmente, el error de relación será en la intensidad sin filtrar:

$$\varepsilon_{rel}(\%) = \frac{I_{E,F}}{I_E} \cdot 100 = \frac{0.277}{5.05} \cdot 100 = 5.49 \%$$

El error de relación será en la intensidad filtrada es:

$$\varepsilon_{rel}(\%) = \frac{I_{E,F}}{I_E} \cdot 100 = \frac{0.089}{5.05} \cdot 100 = 1.76 \%$$

El error de ángulo será en la intensidad sin filtrar:

$$\delta(rad) = \frac{I_{E,Q}}{I_E} = \frac{0.16}{5.05} = 3.2 \text{ crad}$$

El error de ángulo será en la intensidad filtrada:

$$\delta(rad) = \frac{I_{E,Q}}{I_E} = \frac{0.145}{5.05} = 2.9 \text{ crad}$$

Tabla comparativa entre la intensidad con y sin armónicos:

	$\varepsilon_{rel}(\%)$	$\delta(rad)$
I_E (sin filtrar)	5.49 %	3.2 crad
I_E (1 ^{er} armónico)	1.76 %	1.7 crad

Conclusiones: Para el ensayo al 20 % de la intensidad nominal se comprueba que el transformador cumple con su clase, cometiendo un error de relación del 1.97 % menor del 3 % máximo permitido, y con respecto a la limitación de desfase no hay restricción que deba cumplir, aunque el desfase introducido es comparable al de permitido en otros transformadores con mejor clase.

Con respecto al ensayo a 15 A, vemos que la intensidad error medida es una intensidad con un alto contenido en armónicos, que se ha filtrado para comprobar si variaban muchos los resultados. Y efectivamente, como se aprecia en la tabla, si se coge el primer armónico de la intensidad a 50 Hz, se ve que este cumple con la clase ($1.76 \% < 3 \%$), pero no así, con la intensidad con armónicos que presenta un error de relación mayor que el permitido por su clase. Podría plantearse la necesidad de medir únicamente el valor eficaz del primer armónico a fin de mejorar considerablemente la precisión del transformador.

Práctica nº5: Muestreo y Análisis de Series Temporales

Laboratorio de Instrumentación Eléctrica
4ºB, I.E.M

Gonzalo Sánchez Contreras

Antonio Rubí Rodríguez

Ignacio Sanz Soriano

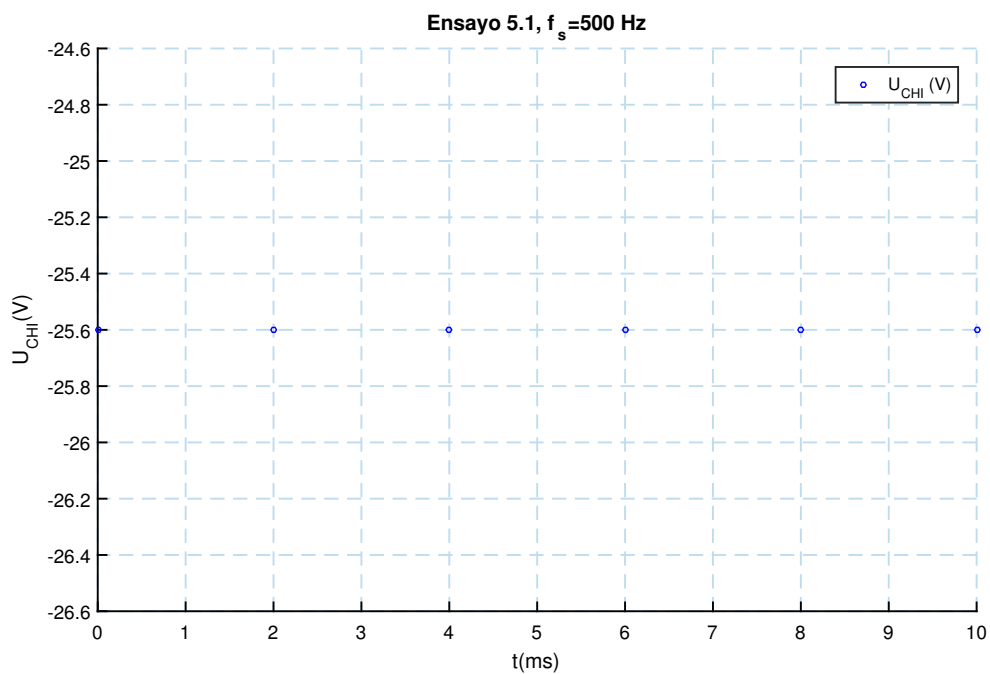
9 de noviembre de 2016

Ensayo 5.1: Muestreo de una señal analógica de 500 Hz

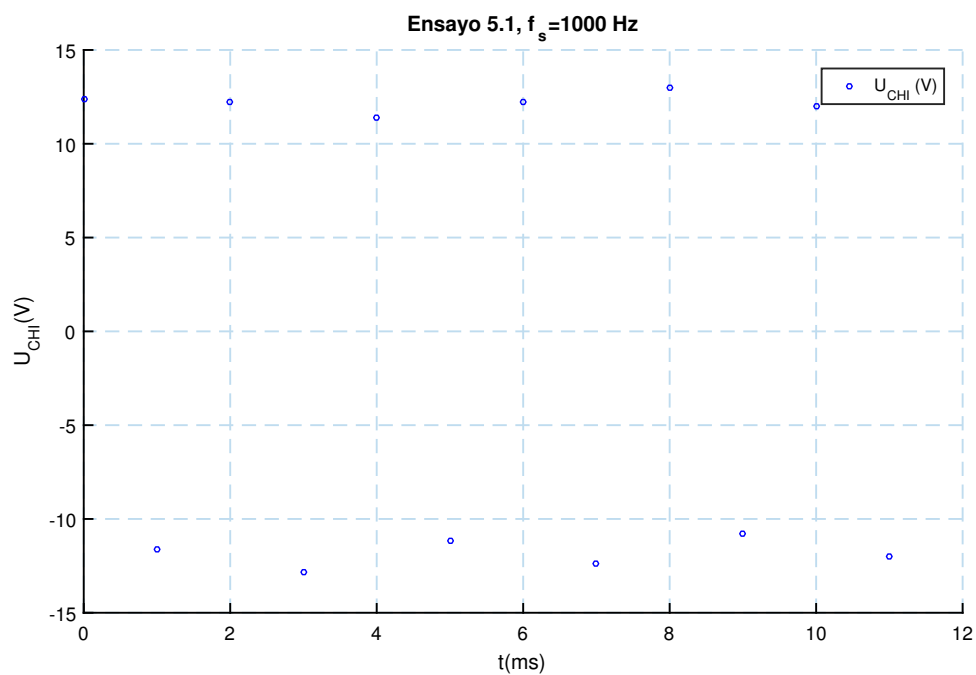
Medidas: La tensión medida en el voltímetro con alcance 20V (al ser de 2000 cuentas presenta dos decimales) es:

$$U = 12.83 \text{ V}$$

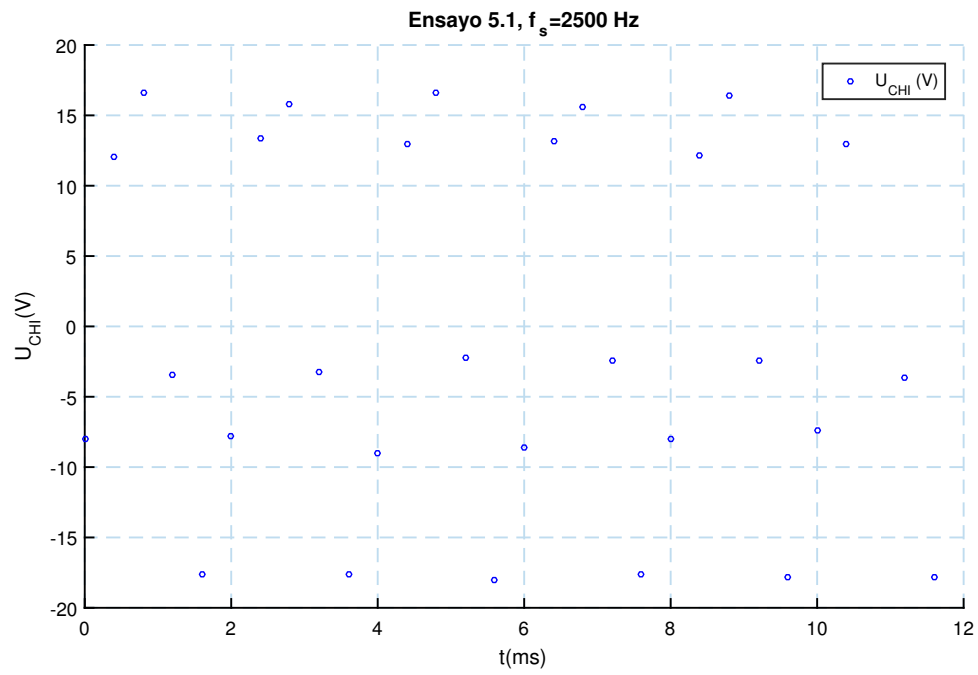
- $f_s = 500 \text{ Hz}$:



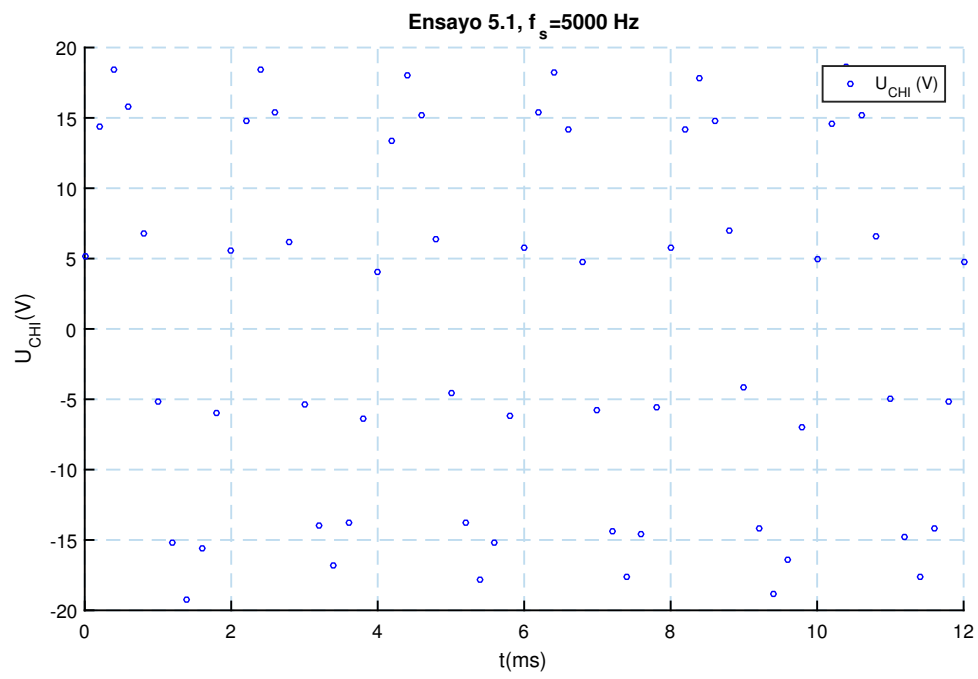
- $f_s = 1000 \text{ Hz}$:



■ $f_s = 2500 \text{ Hz}$:

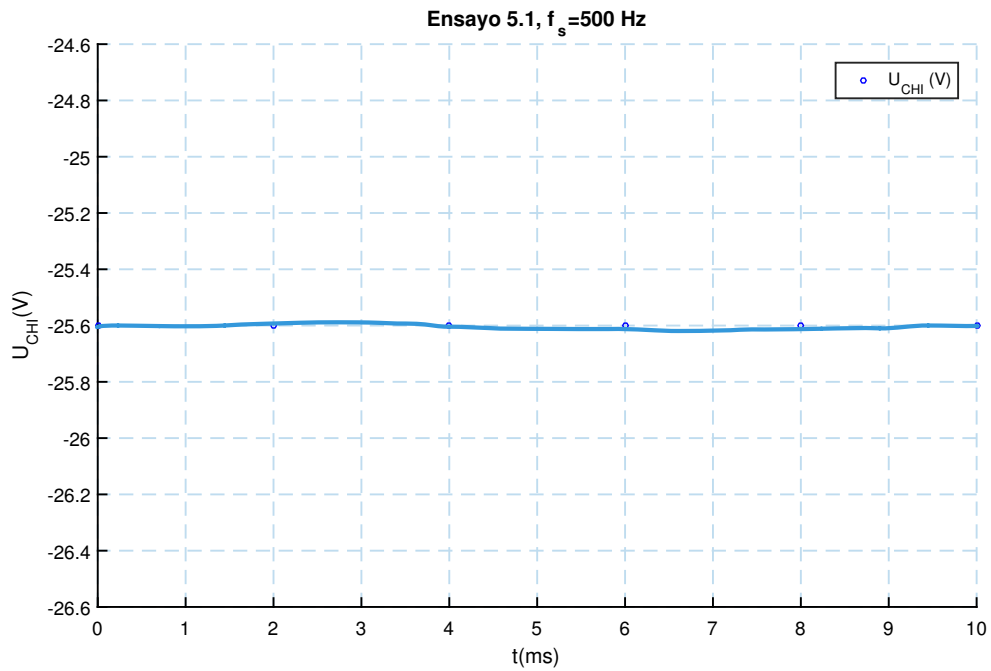


■ $f_s = 5000 \text{ Hz}$:

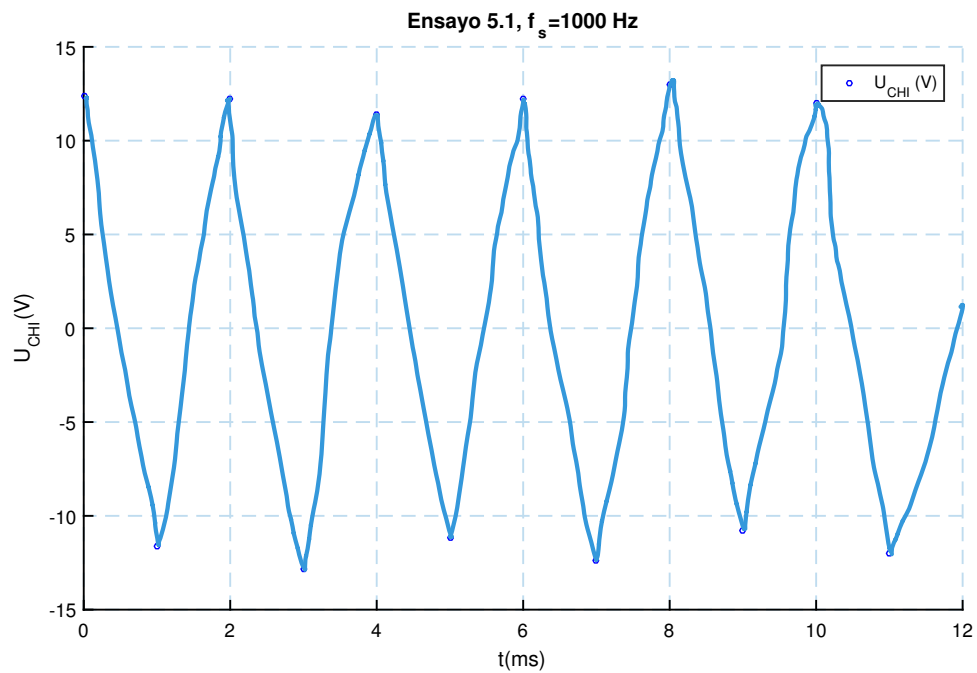


Resultados: A mano alzada, se unen los puntos para dibujar las ondas:

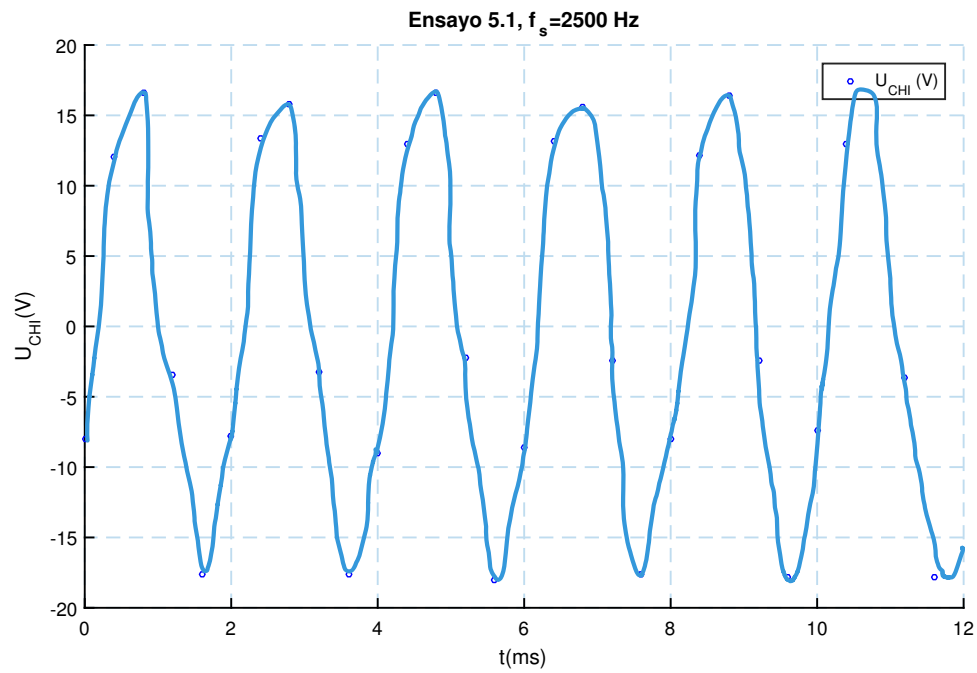
- $f_s = 500 \text{ Hz}$. La señal obtenida es continua:



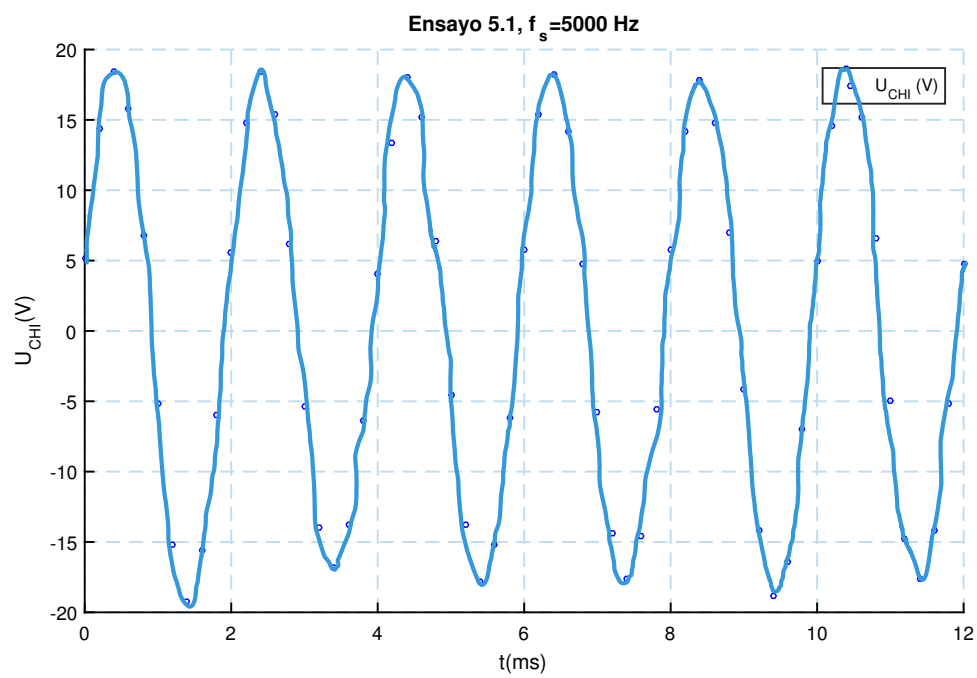
- $f_s = 1000 \text{ Hz}$. La señal obtenida es triangular:



- $f_s = 2500 \text{ Hz}$. La señal obtenida es senoidal:



- $f_s = 5000 \text{ Hz}$. La señal obtenida es senoidal:



Conclusiones:

1. Para una frecuencia de muestreo de $f_s = 500 \text{ Hz}$, la señal analógica obtenida corresponde a una señal de continua ($f = 0 \text{ Hz}$) con una tensión de $U = -25.6 \text{ mV}$. Por tanto, la gráfica que resulta no es comparable con la señal real que se tiene en los cálculos previos. Esto se debe a que la frecuencia de muestreo es $f_s < 2 \cdot f_a$ y se produce el efecto *aliasing* que hace que la señal muestreada se vea como una señal de frecuencia menor, en este caso continua.
2. Para una frecuencia de muestreo de $f_s = 1000 \text{ Hz}$, la señal analógica obtenida corresponde a una señal de aproximadamente $f_a = \frac{1}{T} = \frac{1}{2 \text{ ms}} = 500 \text{ Hz}$ con una tensión pico-pico de aproximadamente 25.8 V y de valor eficaz:

$$U_{ef} = \frac{U_{pico-pico}}{2 \cdot \sqrt{2}} = \frac{25.8}{2 \cdot \sqrt{2}} = 9.12 \text{ V}$$

que se aleja de la esperada de la corona de 13 V . Como se tiene que $f_s = 2 \cdot f_a$, la frecuencia de la señal obtenida es la real, que resulta ser $f_a = 500 \text{ Hz}$ como se había supuesto en la primera gráfica.

3. Para una frecuencia de muestreo de $f_s = 2500 \text{ Hz}$, la señal analógica obtenida corresponde a una señal de aproximadamente $f_a = \frac{1}{T} = \frac{1}{2 \text{ ms}} = 500 \text{ Hz}$ con una tensión pico-pico de aproximadamente 35 V y de valor eficaz:

$$U_{ef} = \frac{U_{pico-pico}}{2 \cdot \sqrt{2}} = \frac{35}{2 \cdot \sqrt{2}} = 12.37 \text{ V}$$

que es muy próxima a la tensión inyectada por la corona. Como en este caso $f_s > 2 \cdot f_a$, la frecuencia de la señal obtenida es la real, que resulta ser $f_a = 500 \text{ Hz}$ como se había supuesto en la primera gráfica.

4. Para una frecuencia de muestreo de $f_s = 5000 \text{ Hz}$, la señal analógica obtenida corresponde a una señal de aproximadamente $f_a = \frac{1}{T} = \frac{1}{2 \text{ ms}} = 500 \text{ Hz}$ con una tensión pico-pico de aproximadamente 36.8 V y de valor eficaz:

$$U_{ef} = \frac{U_{pico-pico}}{2 \cdot \sqrt{2}} = \frac{36.8}{2 \cdot \sqrt{2}} = 13.01 \text{ V}$$

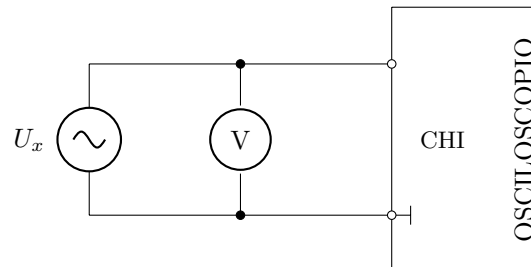
que es casi idéntica a la tensión de la corona. Al igual que en el caso anterior $f_s > 2 \cdot f_a$, la frecuencia de la señal obtenida es la real, que resulta ser $f_a = 500 \text{ Hz}$ como se había supuesto en la primera gráfica.

Como conclusión final, se comprueba que efectivamente es una señal de 500 Hz y se aprecia también que el *aliasing* no solo influye en la frecuencia resultante a la hora de reconstruir la onda, sino que también lo hace en la medida del valor eficaz y pico pico de la señal, pues a medida que aumenta la frecuencia de muestreo, más se parecen los valores de tensión medidos con los que efectivamente se introducen desde la red.

Ensayo 5.2: Muestreo de una señal analógica de frecuencia desconocida

Enunciado: Muestreo de una señal senoidal de 5V y frecuencia desconocida.

Esquema:



Preparación:

Alcances de tiempo en el Osciloscopio. Para las tres frecuencias de muestreo distintas, se han calculado sus equivalente alcances en tiempo de muestreo en el osciloscopio. Así, se tiene que:

- Para $f_s = 500$ Hz:

$$f_s = \frac{N_{osc}}{10 \text{ div} \cdot \text{Alcance}} \rightarrow \text{Alcance} = \frac{N_{osc}}{10 \text{ div} \cdot f_s} = \frac{2500}{10 \cdot 500} = 500 \text{ ms/div}$$

- Para $f_s = 5000$ Hz:

$$f_s = \frac{N_{osc}}{10 \text{ div} \cdot \text{Alcance}} \rightarrow \text{Alcance} = \frac{N_{osc}}{10 \text{ div} \cdot f_s} = \frac{2500}{10 \cdot 5000} = 50 \text{ ms/div}$$

- Para $f_s = 50000$ Hz:

$$f_s = \frac{N_{osc}}{10 \text{ div} \cdot \text{Alcance}} \rightarrow \text{Alcance} = \frac{N_{osc}}{10 \text{ div} \cdot f_s} = \frac{2500}{10 \cdot 50000} = 5 \text{ ms/div}$$

Alcances de tensión en el Osciloscopio. Para un valor eficaz de 5 V, se tiene un valor pico pico de $U_{pico-pico} = 5 \cdot 2 \cdot \sqrt{2} = 14.14 \text{ V}$, por lo que el alcance será $14.14 \text{ V} / 8 \text{ div} = 1.76 \text{ V/div}$, cogiéndose el inmediatamente superior de 2 V/div.

Lista de Aparatos:

Precisión:

- Osciloscopio (2500 muestras):

Alcances tiempo: (5–10–25–50–100–250–500)ns/div–(1–2.5–5–10–25–50–100–250–500)µs/div–(1–2.5–5–10–25–50–100–250–500)ms/div. Precisión (si amplitud mayor de 5div): 1muestra + 100ppm medida + 0.4ns.

Alcances tensión: (5–10–20–50–100–200–500)mV/div–(1–2–5)V/div. Precisión (si alcance mayor de 5mV/div): 3% medida + 0.1div + 1mV.

Eje vertical: 8 div. Eje horizontal: 10 div. Impedancia de entrada: $1\text{M}\Omega(\pm 2\%)$ en paralelo con $20\text{pF}(\pm 3\text{pF})$.

Auxiliares:

- Polímetro digital (2000 cuentas):

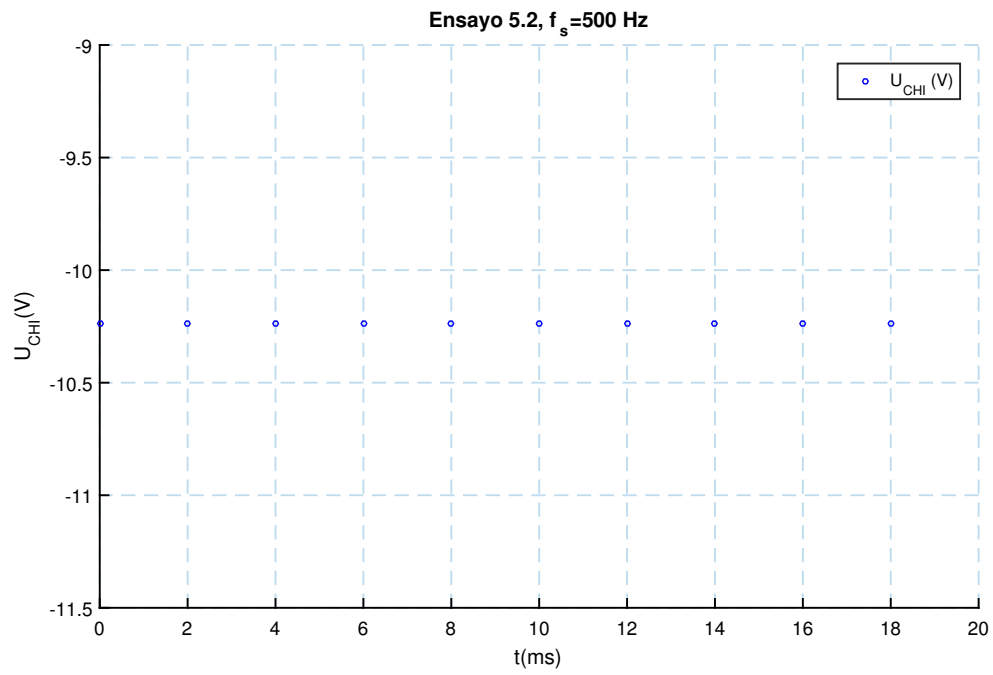
Como voltímetro: 200mV, 2, 20, 200, 1000 V. Resistencia interna: $10\text{M}\Omega$.

Precisión: 0.5%lect. + 1díg. en CC 0.8%lect. + 3díg. en CA.

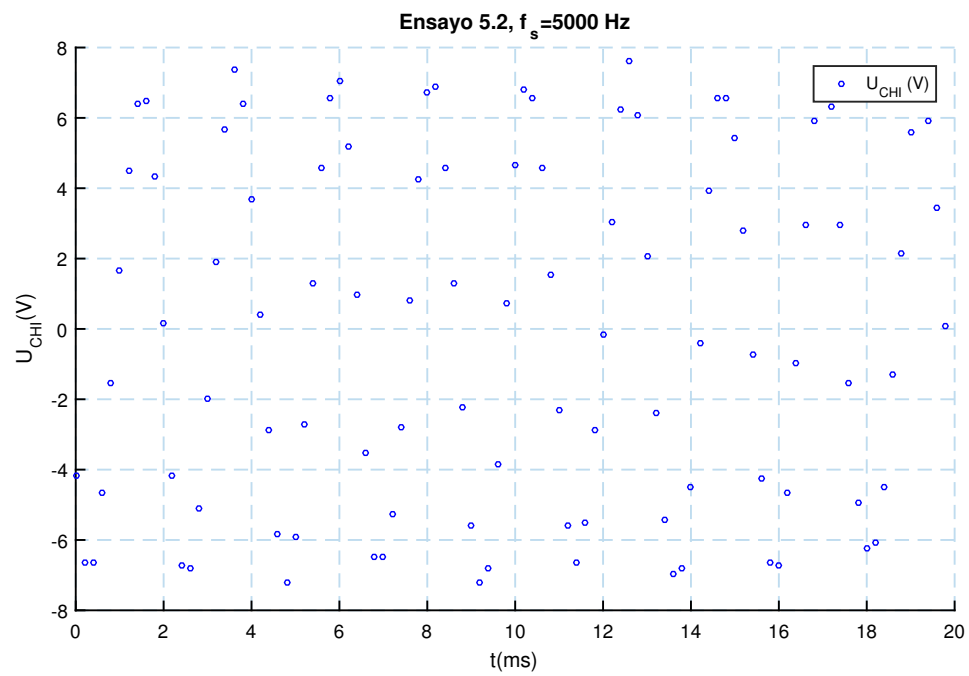
Medidas: La tensión medida en el voltímetro con alcance 20V (al ser de 2000 cuentas presenta dos decimales) es:

$$U = 4.67 \text{ V}$$

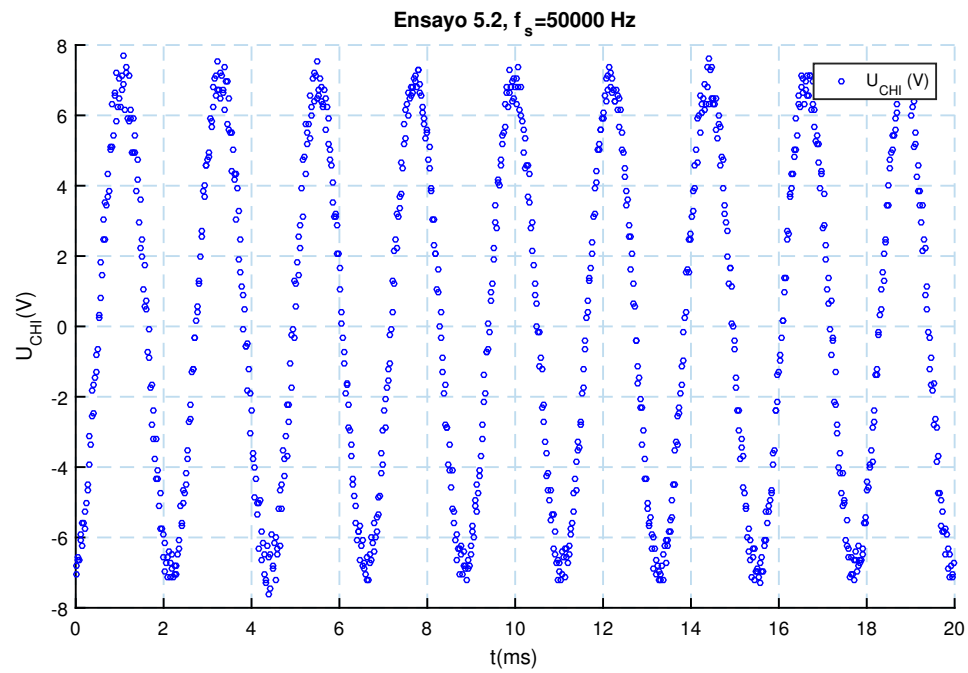
■ $f_s = 500 \text{ Hz}$:



■ $f_s = 5000 \text{ Hz}$:

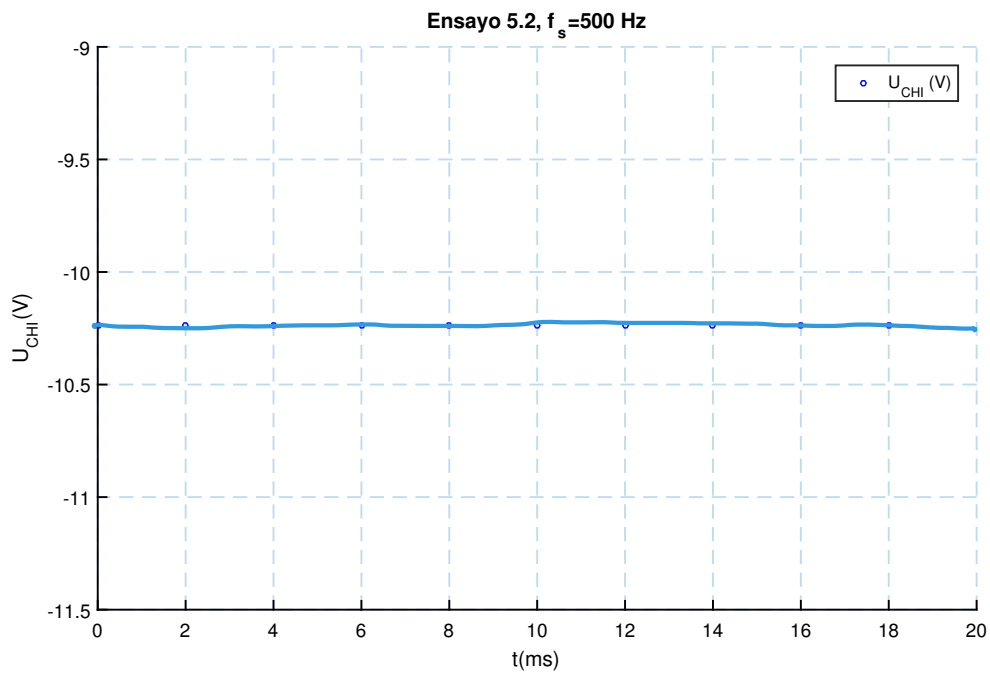


- $f_s = 50000 \text{ Hz}$:

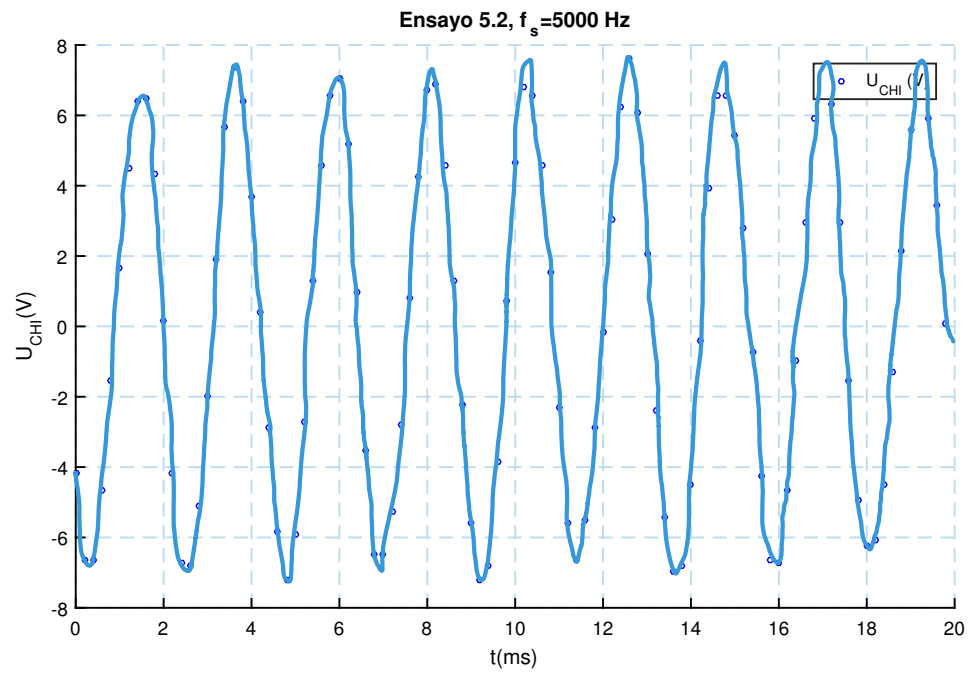


Resultados: A mano alzada, se unen los puntos para dibujar la onda:

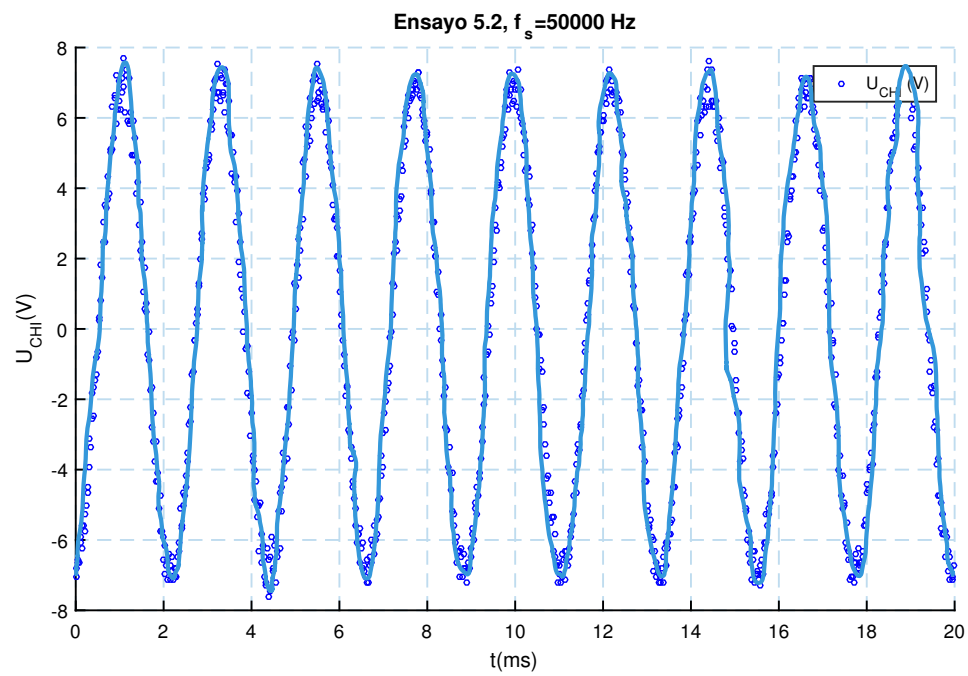
- $f_s = 500 \text{ Hz}$. La señal obtenida es continua:



- $f_s = 5000 \text{ Hz}$. La señal obtenida es senoidal:



- $f_s = 50000 \text{ Hz}$. La señal obtenida es senoidal:



Conclusiones:

1. Para una frecuencia de muestreo de $f_s = 500$ Hz, la señal analógica obtenida corresponde a una señal de continua $f_a = 0$ Hz con una tensión de $U = -10.24$ mV. Esto se debe a que la frecuencia de muestreo es $f_s < 2 \cdot f_a$ y se produce el efecto *aliasing* que hace que la señal muestreada se vea como una señal de frecuencia menor. Puede calcularse que la frecuencia de la señal original es de 500 Hz pues $f_a - f_s = 0$.
2. Para una frecuencia de muestreo de $f_s = 5000$ Hz, se observa claramente que la señal obtenida es de frecuencia $f_a = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\text{ ms}} = 500$ Hz con una tensión pico-pico de aproximadamente 15.12V y de valor eficaz:

$$U_{ef} = \frac{U_{pico-pico}}{2 \cdot \sqrt{2}} = \frac{15.12}{2 \cdot \sqrt{2}} = 5.34 \text{ V}$$

que resulta cercana a los 5 V de la corona, aunque algo superior. Como $f_s > 2 \cdot f_a$ la frecuencia de la señal obtenida es la real, que resulta ser $f_a = 500$ Hz como se acaba de calcular en la frecuencia anterior.

3. Para una frecuencia de muestreo de $f_s = 50000$ Hz, se vuelve a observar claramente que la señal obtenida es de frecuencia $f_a = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\text{ ms}} = 500$ Hz con una tensión pico-pico de aproximadamente 14.64V y de valor eficaz

$$U_{ef} = \frac{U_{pico-pico}}{2 \cdot \sqrt{2}} = \frac{14.64}{2 \cdot \sqrt{2}} = 5.17 \text{ V}$$

que resulta cercana a los 5V de la corona. Directamente se aprecia en la propia gráfica que $f_s \gg f_a$ y por eso se obtiene prácticamente la señal original en ella casi sin necesidad de unir puntos, debido a la gran cantidad obtenida de los mismos.

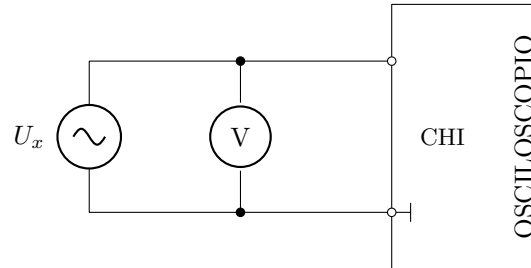
Como conclusión final, afirmar que se trata de una señal de $f_a = 500$ Hz. Con respecto al valor eficaz de la misma, se observa que para las dos frecuencias de muestreo en las que no se produce *aliasing*, $f_s = 5000$ Hz y $f_s = 50000$ Hz, la diferencia en los valores eficaces (o pico pico) medidos es pequeña (0.17 V), sobretodo en relación con el valor de 5 V de la señal.

Es interesante plantear hasta que punto es necesario incrementar la frecuencia de muestreo, para unas ganancias en precisión bastante reducidas tanto a la hora de obtener la frecuencia real de la señal como de obtener su valor eficaz. En este ensayo, se ha comprobado que para una frecuencia de muestreo diez veces superior a la de la señal a medir, los resultados son bastante precisos, y la ganancia adicional de muestrear a una frecuencia 100 veces superior a la señal a medir es bastante pequeña en comparación con el muestreo a una frecuencia 10 veces mayor que la de la señal a medir.

Ensayo 5.3: Cuantización y número de bits

Enunciado: Cuantización del número de bits de una señal senoidal de 5V y frecuencia desconocida.

Esquema:



Preparación:

Suponiendo un osciloscopio de 4 bits, y reservando el primero de estos para el signo de la tensión medida, sabiendo que se va a usar el alcance de 1/div, el mayor valor de la tensión positiva que se podrá leer son 5 V, y con 3 bits disponibles para almacenar valores menos uno reservado para el 0, el incremento de tensión mínima por bit esperado es de:

$$\Delta U = \frac{U_{m\acute{a}x}}{2^n - 1} = \frac{5}{2^3 - 1} = 0.625 \text{ V}$$

que redondeado a un valor entero será de 0.7 o 0.8 V por bit.

Suponiendo un osciloscopio de 8 bits, y reservando el primero de estos para el signo de la tensión medida, sabiendo que se va a usar el alcance de 1/div, el mayor valor de la tensión positiva que se podrá leer son 5 V, y con 7 bits disponibles para almacenar valores menos uno reservado para el 0, el incremento de tensión mínima por bit esperado es de:

$$\Delta U = \frac{U_{m\acute{a}x}}{2^n - 1} = \frac{5}{2^7 - 1} = 0.039 \text{ V}$$

que redondeado a un valor entero será de 0.03 o 0.04 V por bit.

Lista de Aparatos:

Precisión:

- Osciloscopio (2500 muestras):

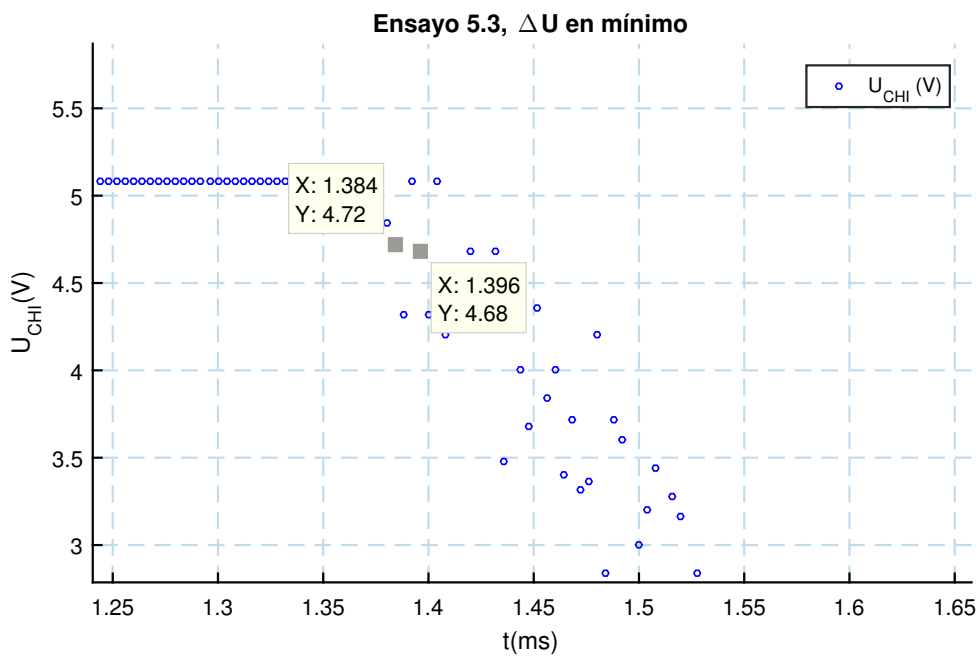
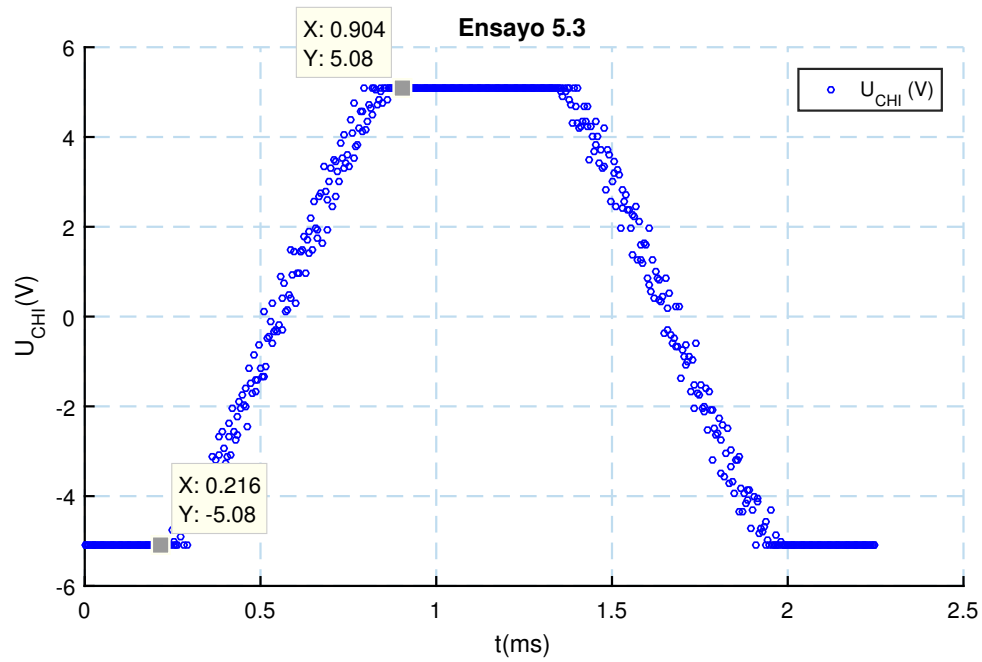
Alcances tiempo: (5–10–25–50–100–250–500)ns/div–(1–2.5–5–10–25–50–100–250–500)μs/div–(1–2.5–5–10–25–50–100–250–500)ms/div. Precisión (si amplitud mayor de 5div): 1muestra + 100ppm medida + 0.4ns.

Alcances tensión: (5–10–20–50–100–200–500)mV/div–(1–2–5)V/div. Precisión (si alcance mayor de 5mV/div): 3% medida + 0.1div + 1mV.

Eje vertical: 8 div. Eje horizontal: 10 div. Impedancia de entrada: 1MΩ(±2%) en paralelo con 20pF(±3pF) .

Auxiliares:

- Polímetro digital (2000 cuentas): Como voltímetro: 200mV, 2, 20, 200, 1000 V. Resistencia interna: 10MΩ. Precisión: 0.5 %lect. + 1díg. en CC 0.8 %lect. + 3díg. en CA.

Medidas:Resultados:

Los valores máximos y mínimos de tensión medidos son 5.08 y -5.08 V. El mínimo incremento de tensión medido (ΔU) es 0.04 V. Con un incremento mínimo de tensión de 0.04 V, se tiene una tensión de pico positiva o negativa de:

$$U_{pico-pico} = \Delta U \cdot n = 0.04 \cdot 127 = 5.08 V$$

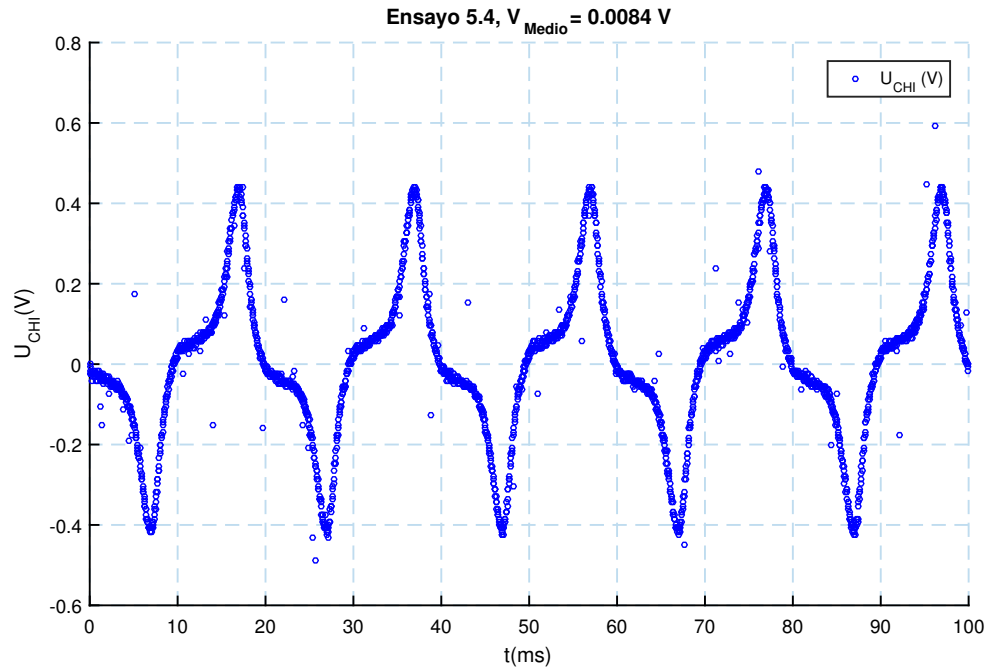
Conclusiones:

Se comprueba que el osciloscopio es de 8 bits, y ha calculado un incremento mínimo de tensión para un alcance 1 V/div la señal de entrada de 5 V de valor 0.04 V. Efectivamente no se corresponde el valor máximo de tensión medido con el esperado. Un valor máximo de tensión medido de 5.08 V, se debe a que el osciloscopio es capaz de medir un poco más allá del máximo de su alcance, aunque también es posible que debido a la cuantización, se haya cometido un error, que en el peor de los casos será de 0.04 V con respecto al valor real de la tensión media, y por ello se obtenga un valor de pico superior al real.

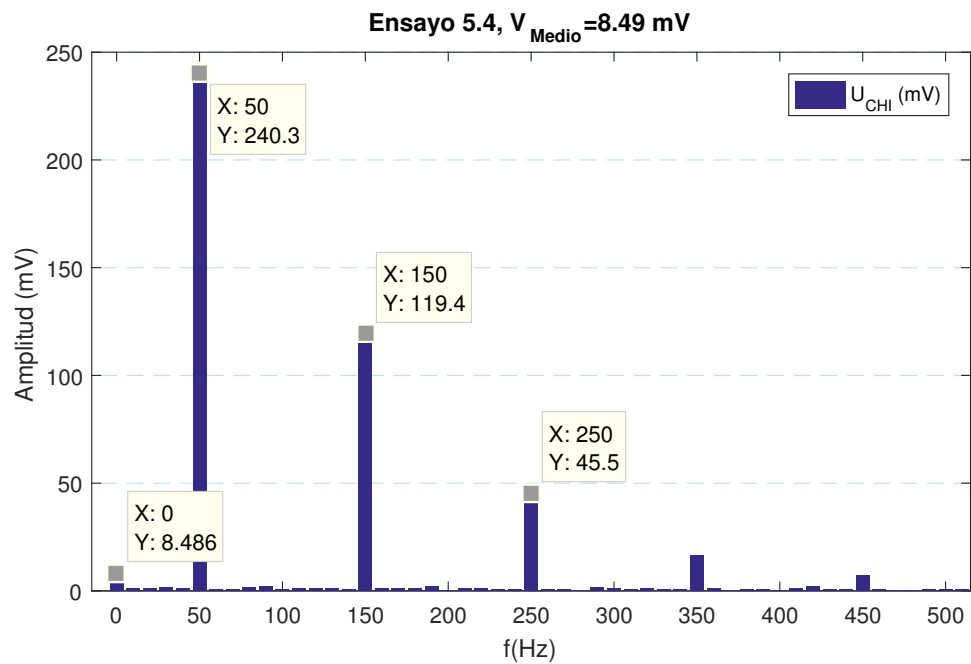
Ensayo 5.4: Análisis en frecuencia de una señal

Medidas:

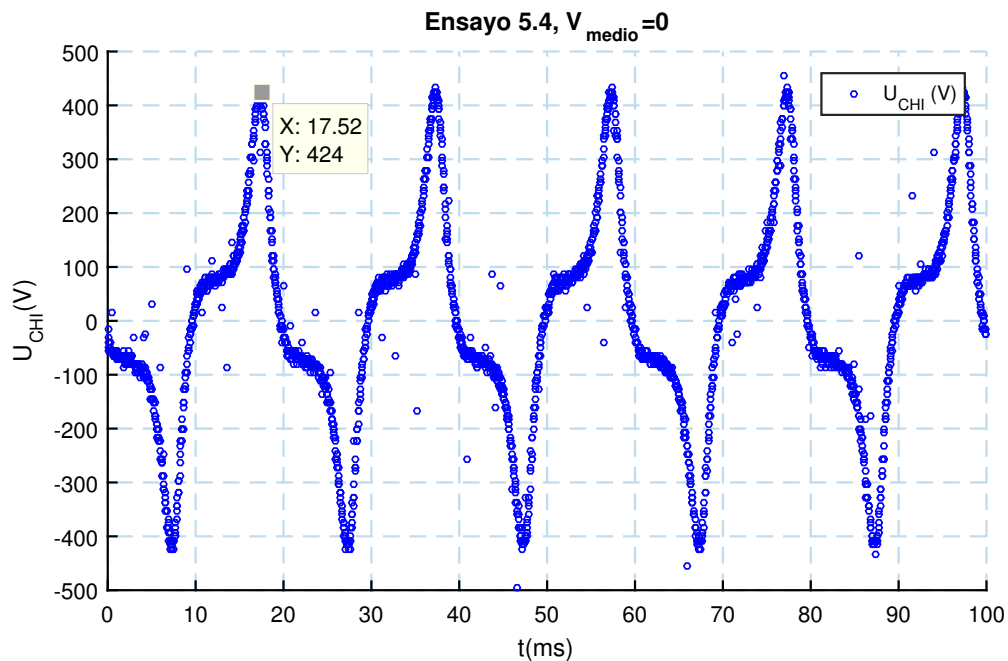
- I_o , Valor Medio $\neq 0$:



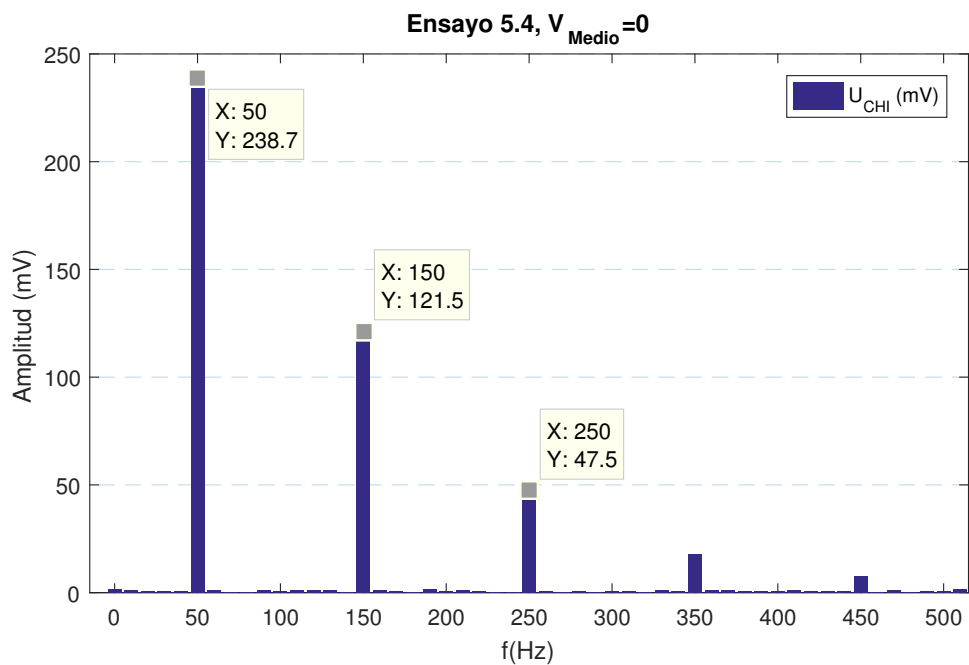
- Transformada de Fourier:



- I_o , Valor Medio =0:



- Transformada de Fourier:



Resultados: Se ha obtenido un valor de pico de la tensión en el osciloscopio de 424 mV que es bastante parecida a la esperada de 442 mV calculados previamente. Además, se aprecia que la onda contiene armónicos, en los múltiplos impares de la frecuencia fundamental, como se esperaba, y ya que se trata de una onda simétrica.

Conclusiones: De las gráficas obtenidas se pueden sacar varias conclusiones. Por un lado, no es necesario el uso de ventanas, ya que al ser conocida la frecuencia de la onda a muestrear, se ha elegido correctamente el período o el número de muestras al que aplicar la transformada de Fourier, y por lo tanto no hay fuga espectral fruto de muestreo asíncrono. Se aprecian claramente los armónicos, y no es necesario el uso de ventanas para atenuar y localizar los armónicos principales.

Por otro lado, se ha comprobado la existencia de armónicos en la intensidad de vacío, únicamente a múltiplos impares de la frecuencia fundamental de la onda.

Además, como se han representado 100 ms, es decir, 2500 muestras o 5 períodos, las frecuencias obtenidas en la transformada de Fourier se muestran con una resolución de 10 Hz.

Se debe notar que este hecho también supone que la transformada mostraría un número de frecuencias igual a la mitad del número de muestras, es decir, 1250 frecuencias distintas. Sabiendo que la resolución de las mismas es de 10 Hz, la transformada muestra frecuencias hasta los 1250 Hz. Debido a que el valor de los armónicos en estas frecuencias tan alejadas de la fundamental es prácticamente 0, se ha optado por representar únicamente hasta frecuencias del entorno de los 500 Hz.

Práctica nº6: Obtención de la Curva de Pérdidas en el Hierro

Laboratorio de Instrumentación Eléctrica
4ºB, I.E.M

Gonzalo Sánchez Contreras

Antonio Rubí Rodríguez

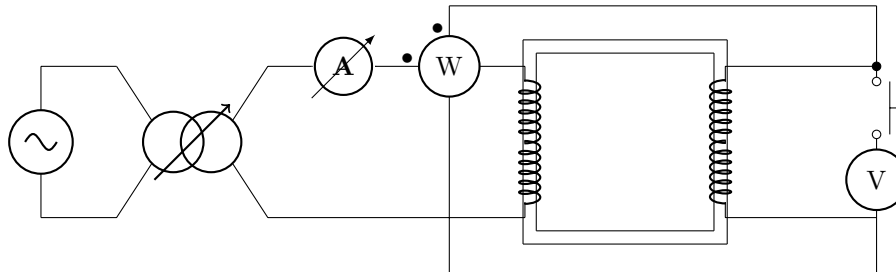
Ignacio Sanz Soriano

15 de noviembre de 2016

Ensayo 6.1: Curva de Pérdidas

Enunciado: Medida de la curva específica de pérdidas en el hierro de un material ferromagnético en función del campo B.

Esquema:



Preparación: Todos los aparatos serán seleccionados para medir con la mejor precisión posible para un campo B de cresta de 1.5 T. Las características del marco de Epstein a ensayar son:

- Cuatro bobinas idénticas de 175 espiras, 700 espiras por arrollamiento.
- Cuatro paquetes de chapas de 750 g, y 24.5 cm de longitud.
- Densidad $\rho = 7.65 \text{ kg/dm}^3$, 3 kg.

La sección del material del marco de Epstein será:

$$S = \frac{1}{l \cdot \frac{1}{\rho}} = \frac{1}{2.45 \cdot \frac{1}{7.65}} = 0.04 \text{ dm}^2 = 4 \text{ cm}^2$$

Selección del Voltímetro. La tensión en el arrollamiento interno ($N_{int} = 700$ espiras) del marco de Epstein, a una frecuencia de 50 Hz y para un $\hat{B} = 1.5 \text{ T}$ es:

$$U_{ef} = 4.44 \cdot N_{int} \cdot f \cdot \hat{B} \cdot S = 4.44 \cdot 700 \cdot 50 \cdot 1.5 \cdot 0.04 \cdot 10^{-2} = 93.24 \text{ V}$$

Se ha de tener en cuenta que es posible que la tensión a la salida del voltímetro no sea sinusoidal. Las incertidumbres de los voltímetros disponibles son las siguientes:

Voltímetro	Incertidumbre
PROMAX FP-2b (2000 cuentas)	0.8 %lect. + 3 dig. en CA.
PROMAX PD-183 (20000 cuentas)	1 %lect. + 10 dig. en CA.

Con el voltímetro PROMAX FP-2b (2000 cuentas) en el alcance de 200 V, la incertidumbre de la medida vale:

$$\alpha(U_{ef}) = \frac{0.8}{100} \cdot U_{ef} + 3 \cdot 0.1 = \frac{0.8}{100} \cdot 93.24 + 3 \cdot 0.1 = 1.046 \text{ V}$$

$$\varepsilon(U_{ef}) = \frac{\alpha(U_{ef})}{U_{ef}} \cdot 100 = \frac{1.046}{93.24} \cdot 100 = 1.12 \%$$

Con el voltímetro PROMAX PD-183 (20000 cuentas) en el alcance de 200 V, la incertidumbre de la medida vale:

$$\alpha(U_{ef}) = \frac{1}{100} \cdot U_{ef} + 10 \cdot 0.01 = \frac{1}{100} \cdot 93.24 + 10 \cdot 0.01 = 1.032 \text{ V}$$

$$\varepsilon(U_{ef}) = \frac{\alpha(U_{ef})}{U_{ef}} \cdot 100 = \frac{1.032}{93.24} \cdot 100 = 1.11 \%$$

Se escogerá el polímetro PROMAX FP-2b (2000 cuentas) como voltímetro en alcance de 200 V, ya que permite medir tensiones no sinusoidales y ambos presentan prácticamente la misma precisión.

Selección de la Alimentación. En cuanto a la alimentación, se descarta el autotransformador VARIAC 220/0-6 V, 15 A porque la tensión a la salida que se requiere es mucho más elevada. Se utilizará el autotransformador VARIAC 220/0-250 V, 4 A, pues es capaz de suministrar la tensión y la intensidad del ensayo, ya que está no superará los 2 A, y el VARIAC es capaz de suministrar hasta 4 A. Se alimentará el VARIAC entre fase y neutro, 127 V para conseguir la mejor resolución posible. La resolución de la tensión medida es:

$$\Delta U = 1 \cdot \frac{127}{220} = 0.58 \text{ V}$$

Selección del Amperímetro. Como amperímetro, se escogerá el amperímetro electromagnético en el alcance de 2.5 A, ya que la intensidad del ensayo se espera que no supere los 2 A. En caso de utilizar un vatímetro digital, no sería necesario, pues este mismo nos podría servir para la medida de la intensidad como amperímetro de control

Selección del Vatímetro. Para una intensidad de 1.5 A y una tensión de 93.24 V, con un campo $\hat{B} = 1.5 \text{ T}$ y una potencia consumida esperada de:

$$P_w = 2.5 \frac{\text{W}}{\text{kg}} \cdot 3 \text{ kg} = 7.5 \text{ W}$$

Se calcula la precisión de los vatímetros disponibles:

1. Vatímetro monofásico 150–300V(50Ω/V); 2.5A(300mΩ)–5A(75mΩ); Escala 750 W (75div); clase 1, en alcances de 150 V y 2.5 A presenta una incertidumbre de valor:

$$P = U \cdot I = 150 \cdot 2.5 = 375 \text{ W}$$

$$\alpha(P) = \frac{1}{100} \cdot P = \frac{1}{100} \cdot 375 = 3.75 \text{ W}$$

Corrigiendo el error sistemático cometido debido a la potencia disipada en la bobina voltimétrica, con un valor de la resistencia $R_{vw} = 150 \text{ V} \cdot 50 (\Omega/\text{V}) = 7500 \Omega$ se tiene una incertidumbre final de:

$$P_w = P + \frac{U_{vw}^2}{R_{vw}} = 7.5 + \frac{93.24^2}{7500} = 8.66 \text{ W}$$

$$\varepsilon(P_w) = \frac{\alpha(P)}{P_w} \cdot 100 = \frac{3.75}{8.66} = 43.31 \%$$

2. Vatímetro monofásico $\cos(\varphi)=0.2$: 75–150–300V(15Ω/V); 2.5A(400mΩ)–5A(100mΩ); clase 1; escala: 75 W (75div), en alcances de 150 V y 2.5 A presenta una incertidumbre de valor:

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) = 150 \cdot 2.5 \cdot 0.2 = 75 \text{ W}$$

$$\alpha(P) = \frac{1}{100} \cdot P = \frac{1}{100} \cdot 75 = 0.75 \text{ W}$$

Corrigiendo el error sistemático cometido debido a la potencia disipada en la bobina voltimétrica, con un valor de la resistencia $R_{vw} = 150 \text{ V} \cdot 15 (\Omega/\text{V}) = 2250 \Omega$ se tiene una incertidumbre final de:

$$P_w = P + \frac{U_{vw}^2}{R_{vw}} = 7.5 + \frac{93.24^2}{2250} = 11.36 \text{ W}$$

$$\varepsilon(P_w) = \frac{\alpha(P)}{P_w} \cdot 100 = \frac{0.75}{11.36} = 6.59 \%$$

3. Medidor de potencia HAMEG HM8115-2 (0-110 % en tensión e intensidad), con un alcance de tensión de 150 V y de intensidad de 1.6 A, (8000 cuentas), una precisión de 0.8 %medida + 10 dig. en CA, en alcance de 8 W (catálogo del vatímetro) presenta una incertidumbre de valor:

$$\alpha(P) = \frac{0.8}{100} \cdot P + 10 \cdot 0.001 = \frac{0.8}{100} \cdot 7.5 + 10 \cdot 0.001 = 0.07 \text{ W}$$

$$\varepsilon(P_w) = \frac{\alpha(P)}{P_w} \cdot 100 = \frac{0.07}{7.5} = 0.93 \%$$

4. Medidor de potencia DIRIS A40 (10000 cuentas), con un alcance de potencia de 100 W, y una precisión de 0.5 %medida + 2 dig. en CA presenta una incertidumbre de valor:

$$P = 7.5 \text{ W}$$

$$\alpha(P) = \frac{0.5}{100} \cdot P + 2 \cdot 0.01 = \frac{0.5}{100} \cdot 7.5 + 2 \cdot 0.01 = 0.058 \text{ W}$$

$$\varepsilon(P_w) = \frac{\alpha(P)}{P_w} \cdot 100 = \frac{0.058}{7.5} = 0.77 \%$$

El vatímetro que mejor precisión presenta es el Medidor de potencia DIRIS A40 (10000 cuentas), por lo que se utilizará éste en el ensayo.

Lista de Aparatos:

Aparatos de Precisión:

- V: Polímetro digital PROMAX FP-2b (2000 cuentas). Como voltímetro: 200 mV, 2, 20, 200, 1000 V. Resistencia interna: 10MΩ. Precisión: 0.8 %lect. + 3dí. en CA.
- W: Medidor de potencia DIRIS A40 (10000 cuentas): Potencia activa: alcances: 100 W, 1 kW, 10 kW (ajuste automático del alcance); 0.5 % + 2dig.

Aparatos Auxiliares:

- Autotransformador VARIAC 220V/0-250V; 4 A; resolución para entrada 220V: 1 V.
- A: Amperímetro electromagnético: 2.5A(90mΩ)-5A(22mΩ); escala 0-1(100div); clase 1.

Medidas:

Frecuencia (Hz)	50									75
B _{cresta} Objetivo (T)	0.5	0.8	1.0	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.5
U Objetivo (V)	31.08	49.73	62.16	74.59	80.81	87.02	93.24	99.46	105.67	139.9
U _{medida} (V)	31.1	49.8	62.3	74.7	80.8	87.0	93.1	99.6	105.7	139.8
I _{medida} (mA)	268.1	447.2	583.0	753.8	854.5	978.6	1139	1356	1638	1126
B _{cresta} real (T)	0.5	0.801	1.002	1.202	1.299	1.399	1.498	1.602	1.701	1.499
P _{leída} (W)	1.16	2.8	4.25	6.04	7.04	8.21	9.49	11.01	12.59	18.90
Cte de lectura	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P _{medida} (W)	1.16	2.8	4.25	6.04	7.04	8.21	9.49	11.01	12.59	18.90
R _{vw} (MΩ)	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
P _{vw} (mW)	0.12	0.31	0.485	0.698	0.816	0.946	1.083	1.24	1.396	2.44
Potencia neta (W)	1.16	2.8	4.25	6.04	7.04	8.21	9.49	11.01	12.59	18.90
Pot. pérdidas (W/kg)	0.39	0.93	1.42	2.01	2.35	2.74	3.16	3.67	4.2	6.3

Resultados:

El valor del campo magnético de cresta \hat{B} se ha calculado para cada punto. Para el valor esperado de campo \hat{B} de 1.5 T, se ha obtenido:

$$\hat{B}_{cresta} = \frac{U_{ef}}{4.44 \cdot N \cdot f \cdot S} = \frac{U_{ef}}{4.44 \cdot 700 \cdot 50 \cdot 4 \cdot 10^{-4}} = 1.498 \text{ T}$$

La incertidumbre en la medida de U_{ef} es:

$$\alpha(U_{ef}) = \frac{0.8}{100} \cdot U_{ef} + 3 \cdot 0.1 = \frac{0.8}{100} \cdot 93.1 + 3 \cdot 0.1 = 1.045 \text{ V}$$

$$\varepsilon(U_{ef}) = \frac{\alpha(U_{ef})}{U_{ef}} \cdot 100 = \frac{1.046}{93.24} \cdot 100 = 1.12 \%$$

Por lo que, finalmente, la incertidumbre en la medida de \hat{B} es:

$$\varepsilon(\hat{B}_{cresta}) = \varepsilon(U_{ef}) + \varepsilon(N) + \varepsilon(f) + \varepsilon(S) =$$

$$= 1.12 \% + 0 + 0 + 0 = 1.12 \%$$

La potencia disipada en la bobina voltimétrica del vatímetro se ha calculado como:

$$P_{vw} = \frac{U_{vw}^2}{R_{vw}} = \frac{U_{vw}}{8 \cdot 10^6}$$

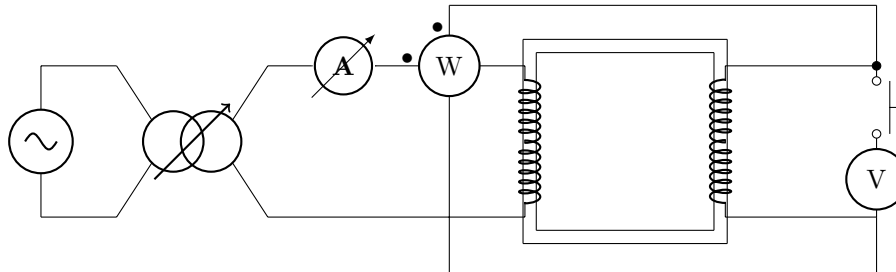
Conclusiones:

El campo de cresta \hat{B} depende de varios factores como la tensión, la frecuencia, el número de espiras y la sección del material, por lo que para valores aproximados medidos de la tensión se consigue medir campos magnéticos casi ideales. Además, la potencia disipada en la bobina voltimétrica del vatímetro es muy pequeña en comparación con la potencia leída (mW frente a W), y esto es despreciable en el cálculo de la potencia neta, es decir, el error sistemático es despreciable en comparación con la medida. La potencia calculada (W/kg) difiere en gran medida del dato del marco de Epstein, afectando también a la potencia leída en el vatímetro.

Ensayo 6.2: Separación de Pérdidas

Enunciado: Separación de las pérdidas por histéresis y por Foucault de un material ferromagnético.

Esquema:



Preparación: Todos los aparatos serán seleccionados para medir con la mejor precisión posible para un campo B de cresta de 1.5 T.

Selección del Voltímetro. La tensión en el arrollamiento interno ($N_{int} = 700$ espiras) del marco de Epstein, a una frecuencia de 50 Hz y para un $\hat{B} = 1.5$ T es:

$$U_{ef} = 4.44 \cdot N_{int} \cdot f \cdot \hat{B} \cdot S = 4.44 \cdot 700 \cdot 50 \cdot 1.5 \cdot 0.04 \cdot 10^{-2} = 139.9 \text{ V}$$

Se ha de tener en cuenta que es posible que la tensión a la salida del voltímetro no sea sinusoidal. Las incertidumbres de los voltímetros disponibles son las siguientes:

Voltímetro	Incertidumbre
PROMAX FP-2b (2000 cuentas)	0.8 %lect. + 3 dig. en CA.
PROMAX PD-183 (20000 cuentas)	1 %lect. + 10 dig. en CA.

Con el voltímetro PROMAX FP-2b (2000 cuentas) en el alcance de 200 V, la incertidumbre de la medida vale:

$$\alpha(U_{ef}) = \frac{0.8}{100} \cdot U_{ef} + 3 \cdot 0.1 = \frac{0.8}{100} \cdot 139.9 + 3 \cdot 0.1 = 1.42 \text{ V}$$

$$\varepsilon(U_{ef}) = \frac{\alpha(U_{ef})}{U_{ef}} \cdot 100 = \frac{1.42}{139.9} \cdot 100 = 1.01 \%$$

Con el voltímetro PROMAX PD-183 (20000 cuentas) en el alcance de 200 V, la incertidumbre de la medida vale:

$$\alpha(U_{ef}) = \frac{1}{100} \cdot U_{ef} + 10 \cdot 0.01 = \frac{1}{100} \cdot 139.9 + 10 \cdot 0.01 = 1.50 \text{ V}$$

$$\varepsilon(U_{ef}) = \frac{\alpha(U_{ef})}{U_{ef}} \cdot 100 = \frac{1.50}{139.9} \cdot 100 = 1.07 \%$$

Se escogerá el polímetro PROMAX FP-2b (2000 cuentas) como voltímetro en alcance de 200 V, que presenta mejor precisión y permite medir tensiones no sinusoidales.

Selección de la Alimentación. En cuanto a la alimentación, se descarta el autotransformador VARIAC 220/0-6 V, 15 A porque la tensión a la salida que se requiere es mucho más elevada. Se utilizará el autotransformador VARIAC 220/0-250 V, 4 A, pues es capaz de suministrar la tensión y la intensidad del ensayo, ya que está no superará los 2 A, y el VARIAC es capaz de suministrar hasta 4 A. Se alimentará el VARIAC entre fase y neutro, 127 V para conseguir la mejor resolución posible. La resolución de la tensión medida es:

$$\Delta U = 1 \cdot \frac{127}{220} = 0.58 \text{ V}$$

Selección del Amperímetro. Como amperímetro, se escogerá el amperímetro electromagnético en el alcance de 2.5 A, ya que la intensidad del ensayo se espera que no supere los 2 A. En caso de utilizar un vatímetro digital, no sería necesario, pues este mismo nos podría servir para la medida de la intensidad como amperímetro de control.

Selección del Vatímetro. Para una tensión de 93.24 V, con un campo $\hat{B} = 1.5$ T, supondremos una potencia consumida esperada repartida equitativamente entre las de histéresis y Foucault a 50 Hz, de:

$$P_H = 3.75 W$$

$$P_F = 3.75 W$$

y sabiendo que las pérdidas por histéresis aumentan linealmente con la frecuencia y las de Foucault, cuadráticamente con la frecuencia, la potencia esperada aproximada a 75 Hz, para una tensión de 139.9 V, y un campo $\hat{B} = 1.5$ T, es de:

$$P_H = 3.75 \cdot 1.5 = 5.625 W$$

$$P_F = 3.75 \cdot 1.5^2 = 8.438 W$$

por lo que la potencia total aproximada que se espera medir a 75 Hz será de:

$$P_{total} = P_H + P_F = 5.625 + 8.438 = 14.06 W$$

Se calcula la precisión de los vatímetros disponibles:

1. Vatímetro monofásico 150–300V(50Ω/V); 2.5A(300mΩ)–5A(75mΩ); Escala 750 W (75div); clase 1, en alcances de 150 V y 2.5 A presenta una incertidumbre de valor:

$$P = U \cdot I = 150 \cdot 2.5 = 375 W$$

$$\alpha(P) = \frac{1}{100} \cdot P = \frac{1}{100} \cdot 375 = 3.75 W$$

Corrigiendo el error sistemático cometido debido a la potencia disipada en la bobina voltimétrica, con un valor de la resistencia $R_{vw} = 150 V \cdot 50 (\Omega/V) = 7500 \Omega$ se tiene una incertidumbre final de:

$$P_w = P + \frac{U_{vw}^2}{R_{vw}} = 14.06 + \frac{93.24^2}{7500} = 15.22 W$$

$$\varepsilon(P_w) = \frac{\alpha(P)}{P_w} \cdot 100 = \frac{3.75}{15.22} = 24.63 \%$$

2. Vatímetro monofásico $\cos(\varphi)=0.2$: 75–150–300V(15Ω/V); 2.5A(400mΩ)–5A(100mΩ); clase 1; escala: 75 W (75div), en alcances de 150 V y 2.5 A presenta una incertidumbre de valor:

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) = 150 \cdot 2.5 \cdot 0.2 = 75 W$$

$$\alpha(P) = \frac{1}{100} \cdot P = \frac{1}{100} \cdot 75 = 0.75 W$$

Corrigiendo el error sistemático cometido debido a la potencia disipada en la bobina voltimétrica, con un valor de la resistencia $R_{vw} = 150 V \cdot 15 (\Omega/V) = 2250 \Omega$ se tiene una incertidumbre final de:

$$P_w = P + \frac{U_{vw}^2}{R_{vw}} = 14.06 + \frac{93.24^2}{2250} = 17.92 W$$

$$\varepsilon(P_w) = \frac{\alpha(P)}{P_w} \cdot 100 = \frac{0.75}{17.92} = 4.18 \%$$

3. Medidor de potencia HAMEG HM8115-2 (0-110 % en tensión e intensidad), con un alcance de tensión de 150 V y de intensidad de 1.6 A, (8000 cuentas), una precisión de 0.8 %medida + 10 dig. en CA, en alcance de 24 W (catálogo del vatímetro) presenta una incertidumbre de valor:

$$\alpha(P) = \frac{0.8}{100} \cdot P + 10 \cdot 0.01 = \frac{0.8}{100} \cdot 14.06 + 10 \cdot 0.01 = 0.21 \text{ W}$$

$$\varepsilon(P_w) = \frac{\alpha(P)}{P_w} \cdot 100 = \frac{0.21}{14.06} = 1.51 \%$$

4. Medidor de potencia DIRIS A40 (10000 cuentas), con un alcance de potencia de 100 W, y una precisión de 0.5 %medida + 2 dig. en CA presenta una incertidumbre de valor:

$$P = 14.06 \text{ W}$$

$$\alpha(P) = \frac{0.5}{100} \cdot P + 2 \cdot 0.01 = \frac{0.5}{100} \cdot 14.06 + 2 \cdot 0.01 = 0.09 \text{ W}$$

$$\varepsilon(P_w) = \frac{\alpha(P)}{P_w} \cdot 100 = \frac{0.09}{14.06} = 0.64 \%$$

El vatímetro que menor incertidumbre relativa presenta es el Medidor de potencia DIRIS A40 (10000 cuentas), por lo que se utilizará éste.

Lista de Aparatos:

Aparatos de Precisión:

- V: Polímetro digital PROMAX FP-2b (2000 cuentas). Como voltímetro: 200 mV, 2, 20, 200, 1000 V. Resistencia interna: 10MΩ. Precisión: 0.8 %lect. + 3dí. en CA.
- W: Medidor de potencia DIRIS A40 (10000 cuentas): Potencia activa: alcances: 100 W, 1 kW, 10 kW (ajuste automático del alcance); 0.5 % + 2dig.

Aparatos Auxiliares:

- Fuente de 135 V, 75 Hz.
- Autotransformador VARIAC 220V/0-250V; 4 A; resolución para entrada 220V: 1 V.
- A: Amperímetro electromagnético: 2.5A(90mΩ)-5A(22mΩ); escala 0-1(100div); clase 1.

Resultados: Los coeficientes de la curva de pérdidas, K_H y K_F , se despejan resolviendo el sistema siguiente sistema de ecuaciones:

$$P_{total}(f = 50 \text{ Hz}) = P_H + P_F = K_H \cdot f + K_F \cdot f^2 \quad (1)$$

$$P_{total}(f = 75 \text{ Hz}) = P_H + P_F = K_H \cdot f + K_F \cdot f^2 \quad (2)$$

Sustituyendo los valores numéricos obtenidos en el ensayo se tiene:

$$P_{total}(f = 50 \text{ Hz}) = 9.49 = K_H \cdot 50 + K_F \cdot 50^2$$

$$P_{total}(f = 75 \text{ Hz}) = 18.90 = K_H \cdot 75 + K_F \cdot 75^2$$

Y finalmente:

$$K_H = 0.0654$$

$$K_F = 0.002488$$

Las pérdidas correspondientes al **ciclo de histéresis**, serán por lo tanto:

$$P_H(50 \text{ Hz}) = K_H \cdot f = 0.0654 \cdot 50 = 3.27 \text{ W}$$

$$P_H(75 \text{ Hz}) = K_H \cdot f = 0.0654 \cdot 75 = 4.905 \text{ W}$$

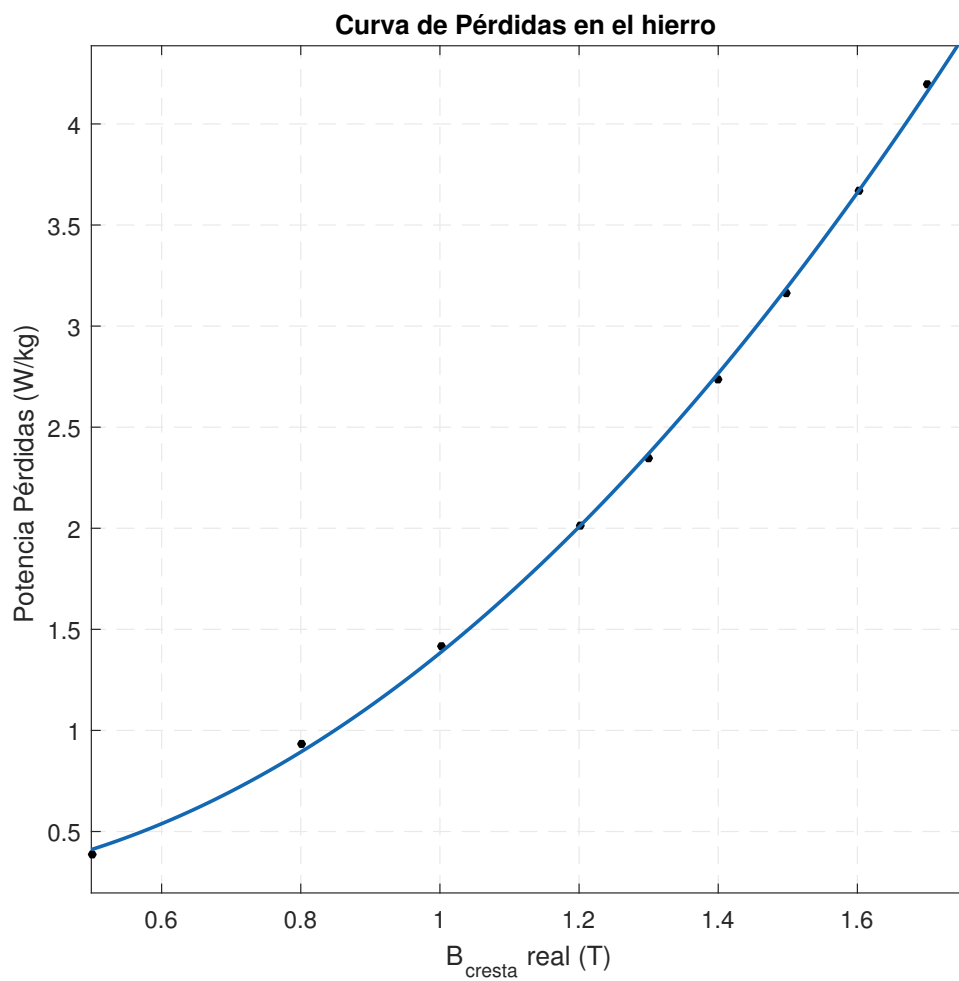
Las pérdidas correspondientes a las **corrientes de Foucault**, serán por lo tanto:

$$P_F(50 \text{ Hz}) = K_F \cdot f^2 = 0.002488 \cdot 50^2 = 6.22 \text{ W}$$

$$P_F(75 \text{ Hz}) = K_F \cdot f^2 = 0.002488 \cdot 75^2 = 13.995 \text{ W}$$

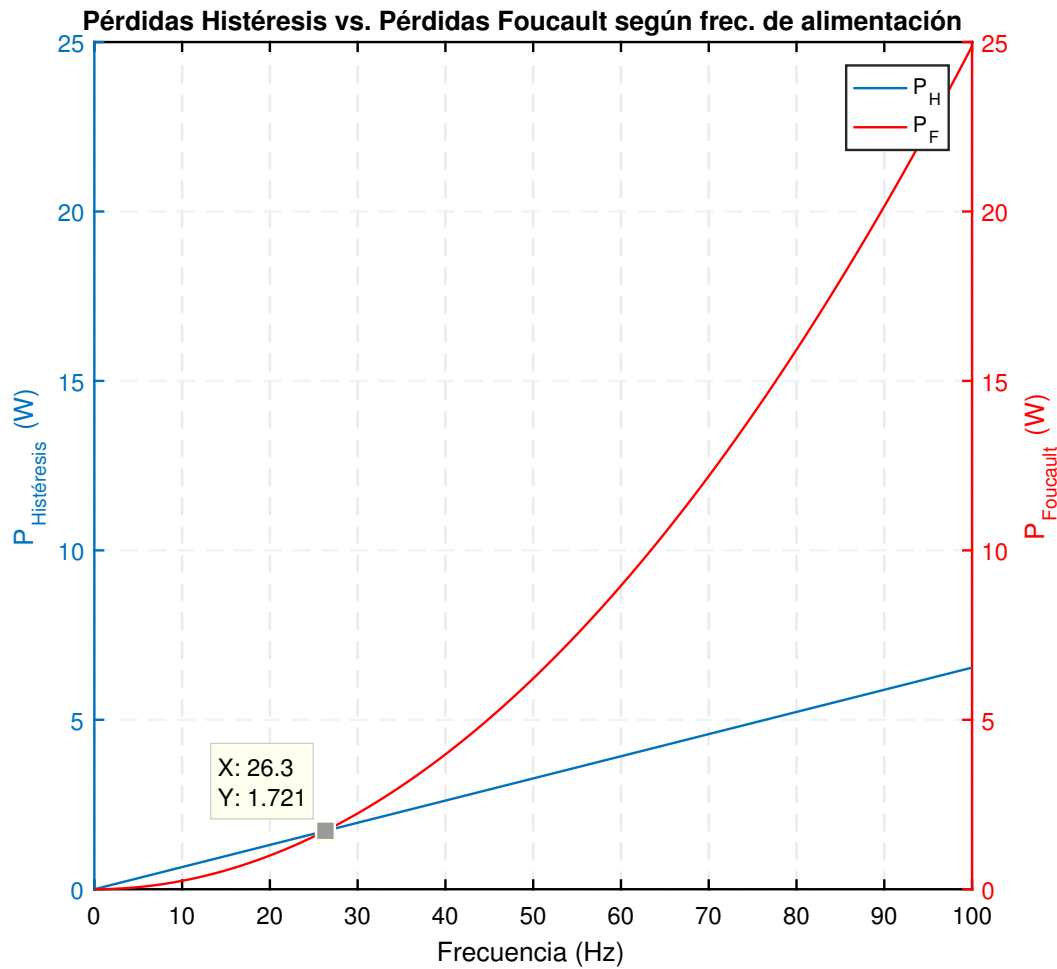
Conclusiones:

1. Curva de pérdidas en el hierro.



Se comprueba en la gráfica que los puntos se aproximan con gran precisión con una curva cuadrática, es decir, las pérdidas del material dependen cuadráticamente del valor del campo magnético pero es necesario hacer una diferenciación entre las pérdidas por histéresis y por Foucault.

2. Pérdidas por Histéresis vs. Pérdidas por Foucault.



En esta representación se refleja la evolución de las pérdidas tanto por histéresis como por Foucault en función de la frecuencia. Se puede concluir que a bajas frecuencias (por debajo de 26.3 Hz en este caso) predominan las pérdidas por histéresis (lineales con la frecuencia) pero una vez superado este valor de frecuencia incrementa considerablemente su peso las pérdidas por Foucault. En la curva de pérdidas obtenidas se han representado las pérdidas a una frecuencia de 50 Hz por lo que el grueso de las pérdidas se debe a las corrientes de Foucault.

Práctica n°7: Obtención Curvas Magnéticas en C.A.

Laboratorio de Instrumentación Eléctrica
4°B, I.E.M

Gonzalo Sánchez Contreras

Antonio Rubí Rodríguez

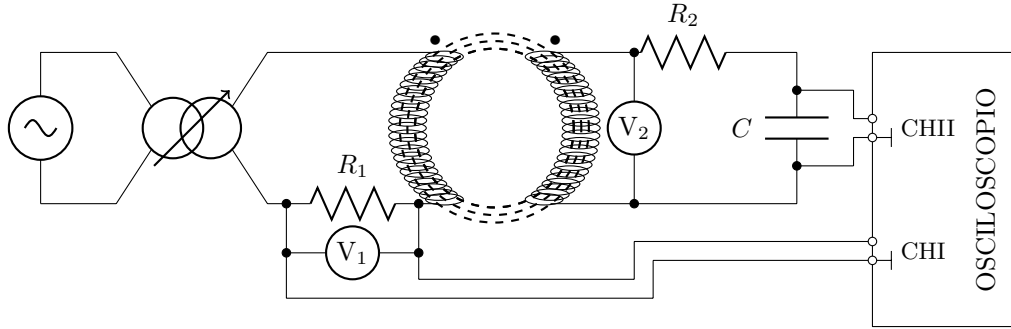
Ignacio Sanz Soriano

22 de noviembre de 2016

Ensayo 7.1. Características dinámicas B-H y S-B del material ferromagnético

Enunciado: Obtención de las características dinámicas B-H y S-B de un material ferromagnético .

Esquema:



Preparación: Todos los aparatos serán seleccionados para medir con la mejor precisión posible un campo B de cresta (\hat{B}) de 1.5 T. Las características del anillo de Rowland a ensayar son:

- Devanado interior: $N_{int} = 329$ espiras; 0.9Ω ; $I_{max} = 1$ A.
- Devanado exterior: $N_{ext} = 68$ espiras; $60 \text{ m}\Omega$; $I_{max} = 5$ A.
- Sección neta: 0.92 cm^2 , longitud media $l = 34 \text{ cm}$.
- Densidad $\rho = 7650 \text{ kg/m}^3$.
- Valores aproximados para $\hat{B} = 1.5 \text{ T}$: $H_{ef} \approx 30 \text{ A/m}$, $\hat{H} \approx 50 \text{ A/m}$.

La tensión en el arrollamiento exterior o de excitación ($N_{exc} = 68$ espiras) para un campo \hat{B} de 1.5 T es :

$$U_{exc} = 4.44 \cdot N_{exc} \cdot f \cdot \hat{B} \cdot S = 4.44 \cdot 68 \cdot 50 \cdot 1.5 \cdot 0.92 \cdot 10^{-4} = 2.083 \text{ V}$$

Aplicando la relación de transformación del anillo a la tensión del arrollamiento de excitación, la tensión inducida en el arrollamiento interior ($N_{int} = 329$ espiras) es :

$$U_{ind} = U_{exc} \cdot \frac{N_{int}}{N_{ext}} = 2.083 \cdot \frac{329}{68} = 10.08 \text{ V}$$

Selección de la resistencia R_1 . Se busca una resistencia R_1 lo más pequeña posible para que la tensión de excitación (U_{exc}) no se vea afectada y se mantenga sinusoidal. Se elegirá la resistencia *shunt* de $100 \text{ m}\Omega$, 1.5 A, 1 %, por ser la más pequeña de entre las disponibles, presentar una buena precisión en comparación con las restantes (1 %) y aguantar sin problemas la intensidad del ensayo, ya la intensidad máxima que soporta es de 1.5 A, y la intensidad prevista en el ensayo es de 150 mA, para un campo \hat{B} de 1.5 T. La tensión que caerá en la resistencia será, por tanto:

$$I_{exc} = \frac{H_{ef} \cdot l}{N_{exc}} = \frac{30 \cdot 0.34}{68} = 150 \text{ mA}$$

$$U_{R_1} = I_{exc} \cdot R_1 = 0.15 \cdot 0.1 = 15 \text{ mV}$$

Se comprueba que efectivamente la tensión de excitación (U_{exc}) es mucho mayor (n veces) que la tensión en la resistencia R_1 :

$$n = \frac{U_{exc}}{U_{R_1}} = \frac{2.083}{0.015} = 138.9$$

$$R_1 \cdot I_{exc} \ll U_{exc}$$

por lo que será esta resistencia de $100 \text{ m}\Omega$, 1.5 A, 1 % la que se utilizará en el ensayo.

Selección de la resistencia R_2 . Se escogerá una resistencia de tal forma que se cumplan las condiciones necesarias para el ensayo, a saber, que el anillo esté en vacío y que se pueda aproximar la intensidad inducida (i_{ind}) como $\frac{u_{ind}}{R_2}$ en el condensador.

Para poder asumir que el anillo de Rowland está en vacío, se ha de cumplir que la intensidad inducida es como mucho el 1 % de la intensidad de magnetización (estimada en 150 mA). Escogemos por ello como resistencia R_2 , la de 100 k Ω de la caja de décadas, clase 0.1, 0.25 W, por satisfacer estos tres requisitos: buena precisión, capacidad de disipar la potencia del ensayo y con una intensidad circulando por ella de valor:

$$I_{ind} = \frac{U_{ind}}{R_2} = \frac{10.08}{100 \cdot 10^3} = 0.1 \text{ mA}$$

Sabiendo, que la intensidad máxima en el arrollamiento de excitación es de 1.5 mA, en el ensayo con R_2 se tiene que:

$$I_{ind}^{exc} = I_{ind} \cdot \frac{N_{exc}}{N_{int}} = 0.1 \cdot \frac{68}{329} = 0.021 \text{ mA}$$

Se puede asumir que efectivamente el anillo está trabajando en vacío, pues $0.021 \ll 1.5$ mA, así que será la resistencia de 100 k Ω la que se empleará en el ensayo.

Selección del condensador C . A continuación, se ha de seleccionar el condensador de forma que la impedancia del mismo (Z_C) sea al menos cincuenta veces menor que la de R_2 . De esta forma, se podrán escoger los condensadores que cumplan que:

$$R_2 \geq 50 \cdot \frac{1}{\omega \cdot C}$$

$$C \geq 50 \cdot \frac{1}{R_2 \cdot \omega} = 50 \cdot \frac{1}{100 \cdot 10^3 \cdot 100\pi} = 1.592 \mu F$$

$$C \geq 1.592 \mu F$$

Entre las distintas opciones, se encuentran condensadores de distintas capacidades: 2 μF , 5 μF , 10 μF , 20 μF , 50 μF , 250 V, clase 5. Ya que todos satisfacen ambas condiciones, se elegirá aquel en el que tenga una tensión tal, que permita medir con la máxima precisión posible en el osciloscopio, por lo que se escogerá junto con los alcances en el osciloscopio a continuación.

Selección de la alimentación. Para seleccionar la alimentación más adecuada para el ensayo, ha de considerarse que tiene que proporcionar la mejor resolución posible. Se dispone de la red de 220 V del laboratorio y de una fuente de 100 V, 50 Hz. Como se tiene una tensión de excitación (U_{exc}) de 2.08 V, se selecciona el VARIAC de 220/0-6 V, 15 A, resolución de 20 mV para 220 V a la entrada frente al VARIAC de 220/0-250, 4 A, resolución de 1 V para 220 V a la entrada, pues el primero proporciona la tensión necesaria para el ensayo y además presenta mejor resolución, por lo que será este último el VARIAC a emplear en el ensayo. También se calculará la

Se calculan las resoluciones obtenidas para cada una de las fuentes de alimentación disponibles. Así, se tiene que:

- Red de 220 V. Alimentando el VARIAC 220/0-6 V, entre fase y neutro, 127 V se tiene una resolución de:

$$\Delta U_{ind} = \Delta U \cdot \frac{127}{220} \cdot \frac{N_{int}}{N_{ext}} = 20 \cdot \frac{127}{220} \cdot \frac{329}{68} = 55.86 \text{ mV}$$

- Fuente de 100 V. Alimentando el VARIAC 220/0-6 V se tiene una resolución de:

$$\Delta U_{ind} = \Delta U \cdot \frac{100}{220} \cdot \frac{N_{int}}{N_{ext}} = 20 \cdot \frac{100}{220} \cdot \frac{329}{68} = 43.98 \text{ mV}$$

Se observa que la resolución en el lado de la tensión de inducido (ΔU_{ind}) es mejor con la fuente de 100 V que alimentando con la red entre fase y neutro, 127 V, por lo que se escoge como alimentación la fuente de 100 V, 50 Hz, que proporciona los 2.08 V necesarios para el ensayo, y se empleará el VARIAC 220/0-6 V, 15 A, resolución de 20 mV para 220 V a la entrada.

Selección de los voltímetros. Los voltímetros se elegirán de manera que se mida con la mejor precisión posible la tensión en la resistencia R_1 y la tensión de inducido U_{ind} . Para seleccionar los voltímetros se ha de tener en cuenta el tipo de tensión que se va a medir (sinusoidal o no sinusoidal). Para las dos tensiones a medir U_{R_1} y U_{ind} , se tiene que:

- Tensión U_{R_1} . Se espera una tensión no sinusoidal, debido a que la intensidad de excitación tampoco lo es, por lo que se utilizará el Multímetro digital PROMAX PD-183 (20000 cuentas, verdadero valor eficaz), en alcance de 200 mV. La incertidumbre esperada en la medida es:

$$\alpha(U_{R_1}) = \frac{1}{100} \cdot U_{R_1} + 10 \cdot 0.01 = \frac{0.8}{100} \cdot 15 + 3 \cdot 0.01 = 0.25 \text{ mV}$$

$$\varepsilon(U_{R_1}) = \frac{\alpha(U_{R_1})}{U_{R_1}} \cdot 100 = \frac{0.25}{15} \cdot 100 = 1.67 \%$$

- Tensión U_{ind} . Se espera una tensión sinusoidal, debido a que la tensión de excitación también lo es, por lo que se utilizará el polímetro digital PROMAX FP-2b (2000 cuentas), en alcance de 20 V. La incertidumbre esperada en la medida es:

$$\alpha(U_{ind}) = \frac{0.8}{100} \cdot U_{ind} + 3 \cdot 0.01 = \frac{0.8}{100} \cdot 10.08 + 3 \cdot 0.01 = 0.011 \text{ V}$$

$$\varepsilon(U_{ind}) = \frac{\alpha(U_{ind})}{U_{ind}} \cdot 100 = \frac{0.11}{10.08} \cdot 100 = 1.1 \%$$

Selección de los alcances del osciloscopio. Los alcances del osciloscopio se ajustarán de tal forma que se mida con la mejor precisión posible la tensión de pico en la resistencia R_1 y en el condensador C .

Eje de tiempos. Por tratarse de ondas de frecuencia igual a 50 Hz, se necesitará un alcance de tiempos de 2 ms/div, y escogiendo el alcance inmediatamente superior se tienen 2.5 ms/div en el eje horizontal del osciloscopio.

Canal I (CHI). Para una tensión en la resistencia R_1 de 15 mV, se tiene una tensión pico-pico de:

$$U_{R_1 p-p} = U_{R_1} \cdot R_1 \cdot 2 \cdot \sqrt{2} = 42.42 \text{ mV}$$

por lo que se necesitan como mínimo en el osciloscopio para 8 divisiones en el eje vertical:

$$\frac{U_{R_1 p-p}}{8 \text{ div}} = 5.30 \text{ mV/div}$$

y seleccionado el alcance inmediatamente superior se consigue un alcance de **10 mV/div** para el canal I.

Canal II (CHII). Como se dispone de varios condensadores, de la misma precisión (5%), se seleccionará aquel que tenga una caída de tensión que sea lo más cercana posible su respectivo alcance inmediatamente superior en el osciloscopio. Para ello, se calcula la tensión en el condensador como:

$$U_C = U_{ind} \cdot \frac{\frac{1}{j\omega \cdot C}}{R_2 + \frac{1}{j\omega \cdot C}} = 10.08 \cdot \frac{\frac{1}{j100\pi \cdot C}}{100 \cdot 10^3 + \frac{1}{j100\pi \cdot C}}$$

donde C son las distintas capacidades disponibles. Para cada capacidad (C) se han obtenido las tensiones eficaces, pico-pico y en mV/div para poder seleccionar el mejor alcance en el osciloscopio. En la tabla se presentan todas las combinaciones posibles:

C (μF)	U_C (mV)	$U_{C_{p-p}}$ (mV)	U_C (mV/div)	Alcance Osc.
50	6.4	18.1	2.26	5
20	16	45.25	5.65	10
10	32	90.79	11.35	20
5	64.2	181.6	22.7	50
2	160.4	453.7	56.71	100

Los condensadores de $10 \mu F$ y de $2 \mu F$ presentan la misma precisión para sus respectivos alcances en el osciloscopio. Se escoge el condensador de capacidad $C = 10 \mu F$, clase 5, 250 V, por ser el proporciona una tensión de pico lo más próxima al alcance inmediatamente superior, por lo que será la tensión que se mida con mejor precisión de entre todas las posibles. Además, se escogerá un alcance de **20 mV/div** en el eje vertical del osciloscopio en el canal II.

Lista de Aparatos:

Aparatos de Precisión:

- V1: Multímetro digital PROMAX PD-183 (20000 cuentas, verdadero valor eficaz). Como voltímetro: 200 mV, 2, 20, 200, 1000 V. Resistencia interna: $10 M\Omega$. Precisión: 1%lect. + 10díg. en CA.
- V2: Polímetro digital PROMAX FP-2b (2000 cuentas). Como voltímetro: 200 mV, 2, 20, 200, 1000 V. Resistencia interna: $10 M\Omega$. Precisión: 0.8%lect. + 3díg. en CA.
- Osciloscopio: Alcances tiempo: (1–2.5–5–10–25–50–100–250–500) μs /div (1–2.5–5–10–25–50–100–250–500)ms/div.
CHI: Alcances tensión: (5–10–20–50–100–200–500)mV/div–(1–2–5)V/div.
CHII: Alcances tensión: (5–10–20–50–100–200–500)mV/div–(1–2–5)V/div.
Eje horizontal: 10div; precisión: 2% en modo XT; 3% en modo XY.
Eje vertical: 8div; precisión: 2%.
- R_1 : Resistencia (shunt): $100 m\Omega$, 1.5A; 1%.
- R_2 : Caja de resistencias 2x(0.1, 1, 10 y 100)k Ω clase 0.1, 0.25W.
- C: Caja de condensadores de 100nF, 470nF, $2 \mu F$, 10 μF , 50 μF ; clase 5; 250V.

Aparatos de Auxiliares:

- Autotransformador VARIAC 220V/0–6V (con aislamiento galvánico); 15A; resolución para entrada 220V: 20mV.
- Fuente de tensión 100 V, 50 Hz.

Medidas:

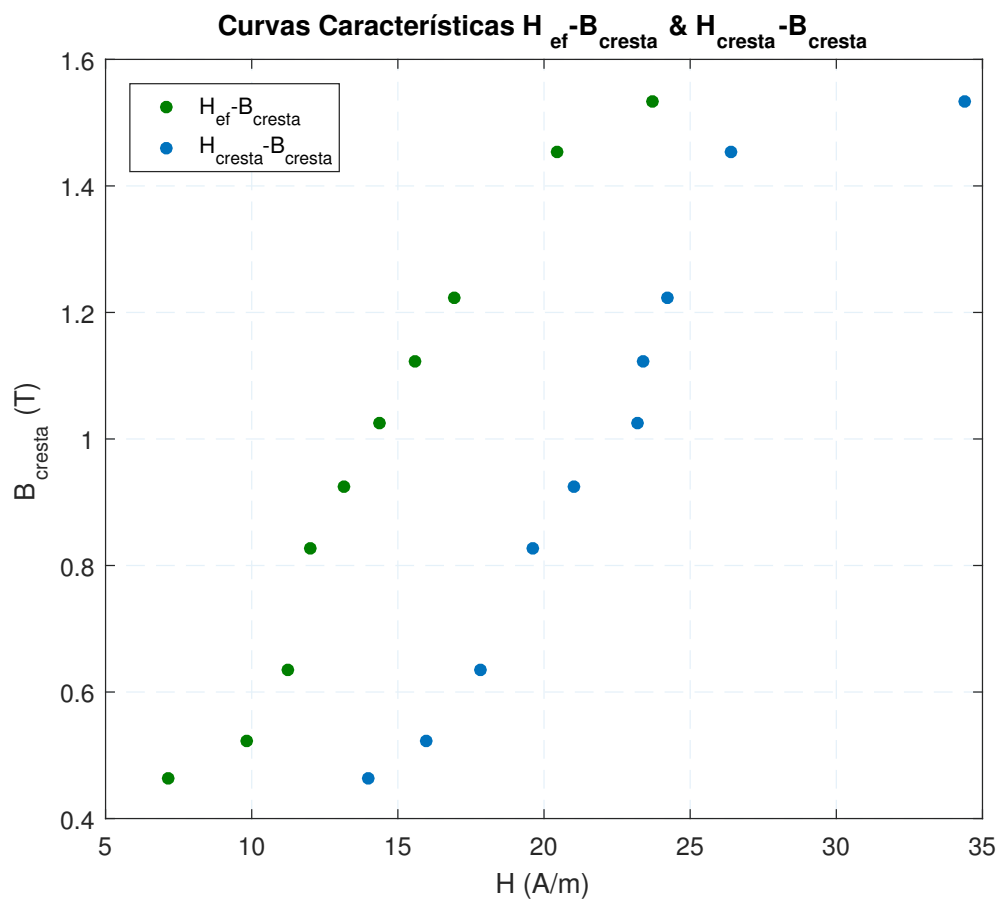
Ensayo a 50 Hz											
Objetivo	B (T)	0.4	0.5	0.6	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.4	1.5
	U_B (V)	0.56	0.69	0.83	1.11	1.25	1.39	1.53	1.67	1.94	2.08

Medidas	U_H (mV)	3.58	4.9	5.62	6.01	6.59	7.18	7.78	8.45	10.22	11.84
	U_B (V)	2.68	3.35	4.04	5.40	6.06	6.76	7.42	8.09	9.42	10.09
	$U_{CHI, cresta}$ (mV)	7	8	8.9	9.8	10.5	11.6	11.7	12.1	13.2	17.2
	$U_{CHII, cresta}$ (mV)	70	79	96	125	140	155	170	185	220	232

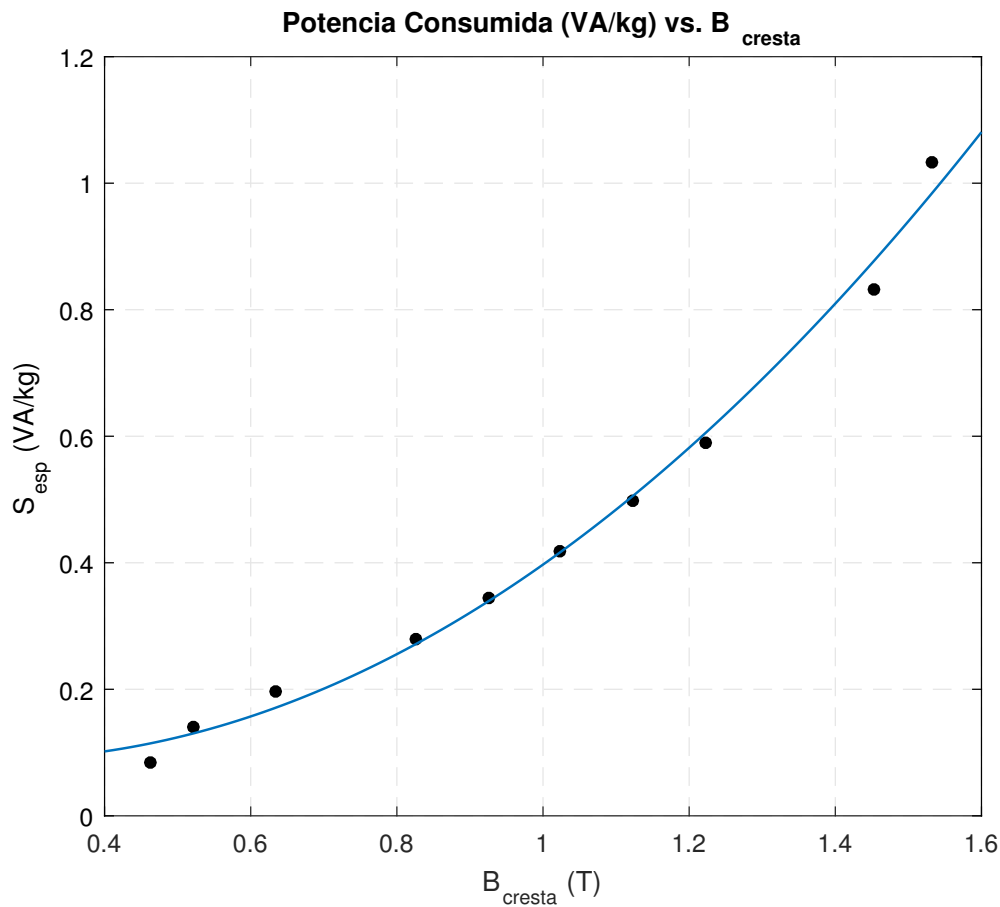
Cálculo a partir de medidas	$B_{cresta} U_B (T)$	0.39	0.49	0.60	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.40	1.50
	$B_{cresta} U_{CHII} (T)$	0.462	0.52	0.63	0.82	0.92	1.024	1.12	1.22	1.45	1.53
	$H_{eficaz} U_H (A/m)$	7.16	9.8	11.24	12.02	13.18	14.36	15.56	16.9	20.44	23.68
	$H_{cresta} U_{CHI} (A/m)$	14	16	17.8	19.6	21	23.2	23.4	24.2	26.4	34.4
	$S_{esp} (VA/kg)$	0.08	0.14	0.2	0.28	0.34	0.42	0.50	0.59	0.83	1.03

Resultados:

1. $B_{cresta} (T)$ - $H_{ef} (A/m)$ y $B_{cresta} (T)$ - $H_{cresta} (A/m)$



2. S_{esp} (VA/kg)- B_{cresta} (T)

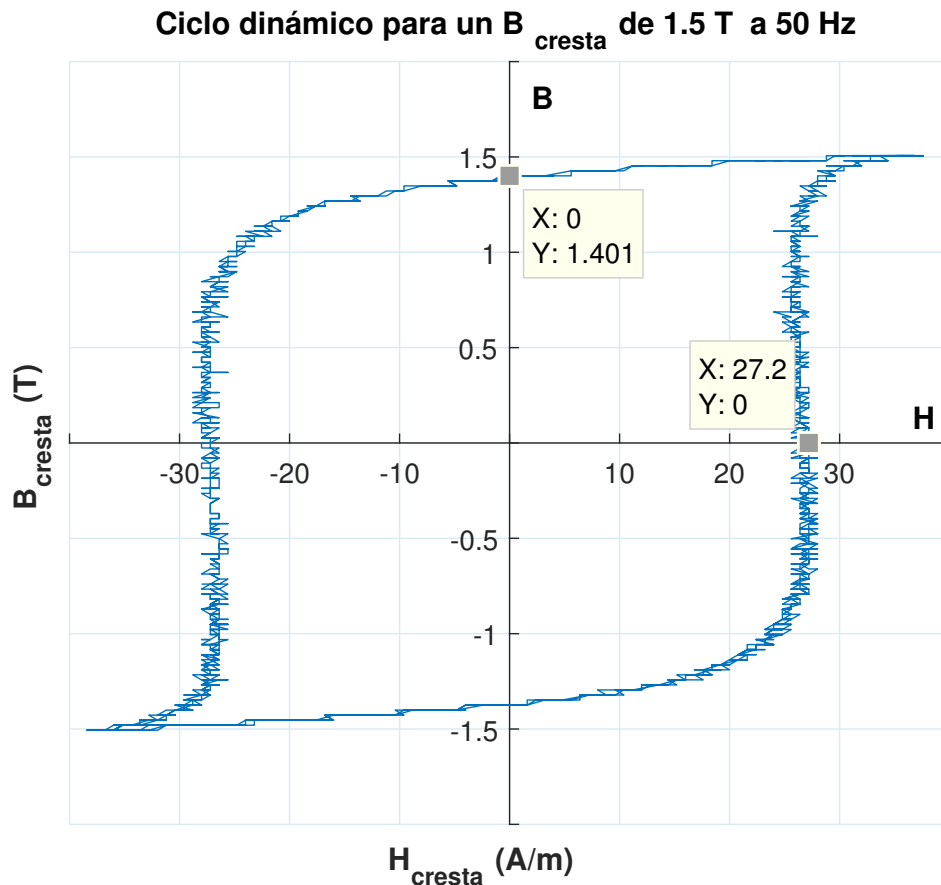


Conclusiones: El ensayo se ha realizado a 0.1Ω cuando debería ser a 1Ω . Esto se debe a que se ha priorizado el no afectar a la forma de la tensión sinusoidal. Sin embargo, a pesar de que si el ensayo se realiza con una $R_1 = 1 \Omega$, (obteniéndose una U_{r1} que es apenas 13 veces menor a la U_{exc}) el valor de U_{ind} medido por el voltímetro V_2 (*No TRMS*) será un valor *No TRMS* que es posible utilizar para calcular el campo \hat{B} . Además, $R_1 = 1 \Omega$ ofrece una mejor precisión para la medida del voltímetro V_1 , ya que se mide más cerca de su alcance. También se ha elegido previamente al ensayo utilizar un condensador de $10 \mu\text{F}$, pero una vez realizado el ensayo, el ruido presente en la señal ha obligado a utilizar un condensador de $2 \mu\text{F}$, que filtra mejor el ruido, permitiendo una medida más precisa.

Ensayo 7.2. Representación del ciclo dinámico a 50 Hz para una inducción de cresta de 1.5 T

Enunciado: Representación de la característica dinámica de un material ferromagnético a 50 Hz.

Medidas: El ciclo dinámico obtenido en el osciloscopio tiene la forma:



Resultados: Los valores obtenidos de la inducción remanente y de la fuerza coercitiva son:

$$B_{\text{remanente}} = 1.401 \text{ T}$$

$$H_{f.\text{coerct.}} = 27.2 \text{ A/m}$$

Incertidumbre de la medida de la inducción remanente:

$$\varepsilon(B_{\text{rem}}) = \varepsilon(U_c^p) + \varepsilon(R_2) + \varepsilon(C) = 3\% + 0.1\% + 5\% = 8.1\%$$

Incertidumbre de la medida de la fuerza coercitiva:

$$\varepsilon(H_{f.\text{coerc.}}) = \varepsilon(R_1) + \varepsilon(U_{R_1}) = 0.1\% + 2\% = 2.1\%$$

Por lo que finalmente se tienen unas medidas de la inducción remanente de:

$$B_{\text{rem}} = 1.401 \pm 0.113 \text{ T} = 1.401 \text{ T} \pm 8.1\%$$

y una medida de la fuerza coercitiva de:

$$H_{f.\text{coerct.}} = 27.2 \pm 0.57 \text{ A/m} = 27.2 \text{ A/m} \pm 2.1\%$$

Conclusiones: La utilización de una resistencia de $100\text{ m}\Omega$ empeora la representación del ciclo de dinámico $B-H$, ya que se miden tensiones muy pequeñas en R_1 y el ruido, (que presenta un valor no despreciable respecto a la señal medida en el osciloscopio) impide la medida con buena precisión. Como se puede visualizar directamente en el *display* del osciloscopio, con U_{R_1} en el eje horizontal *vs.* U_{cond} en el eje vertical, se debe utilizar $R_1=1\text{ }\Omega$, para mejorar tanto la precisión como el ruido de la señal (150 mV frente a 15 mV).

Referencias

- [1] Ignacio Egido Cortés: *Apuntes sobre Instrumentación Eléctrica*, Universidad Pontificia de Comillas (2016).

