

# Práctica nº4: Calibración de Transformadores de Medida

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

Gonzalo Sánchez Contreras

Antonio Rubí Rodríguez

Ignacio Sanz Soriano

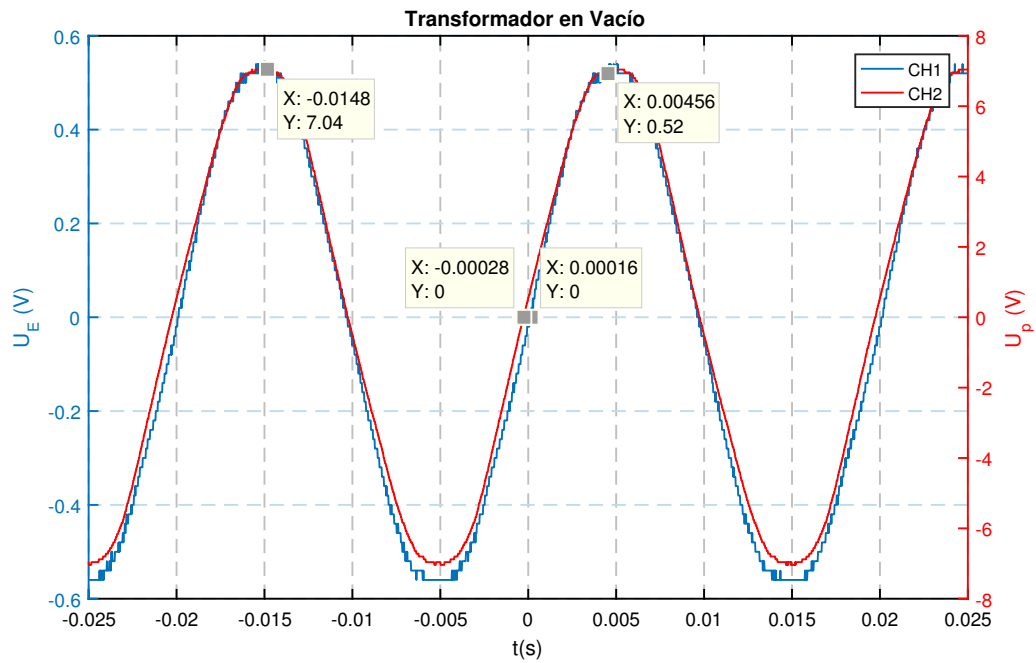
31 de octubre de 2016



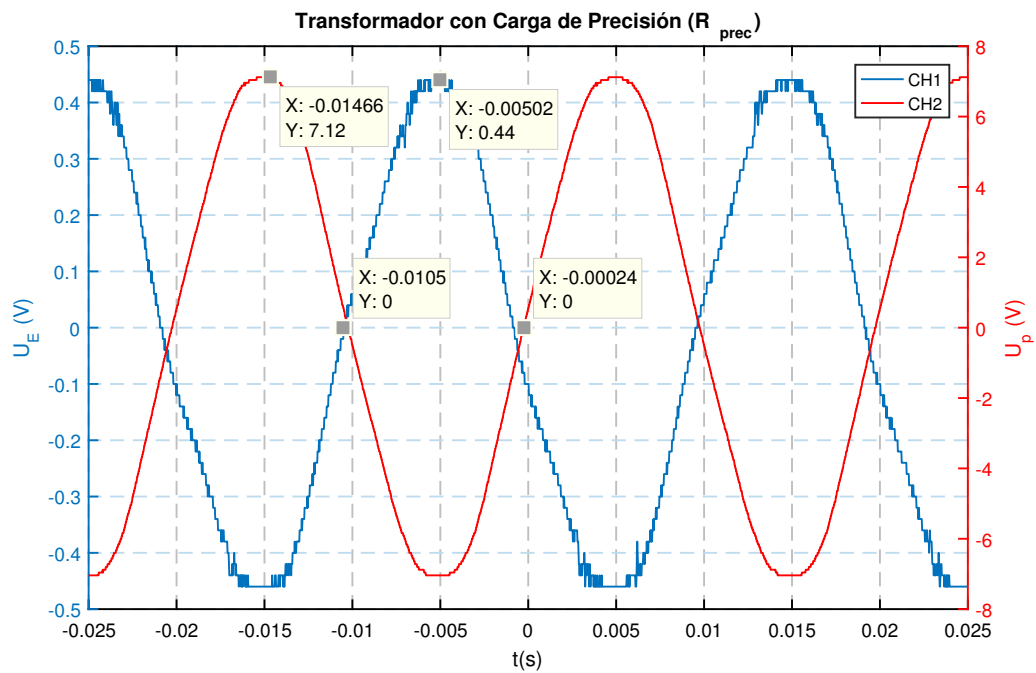
## Ensayo 4.1: Calibración de un Transformador de Tensión

### 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:

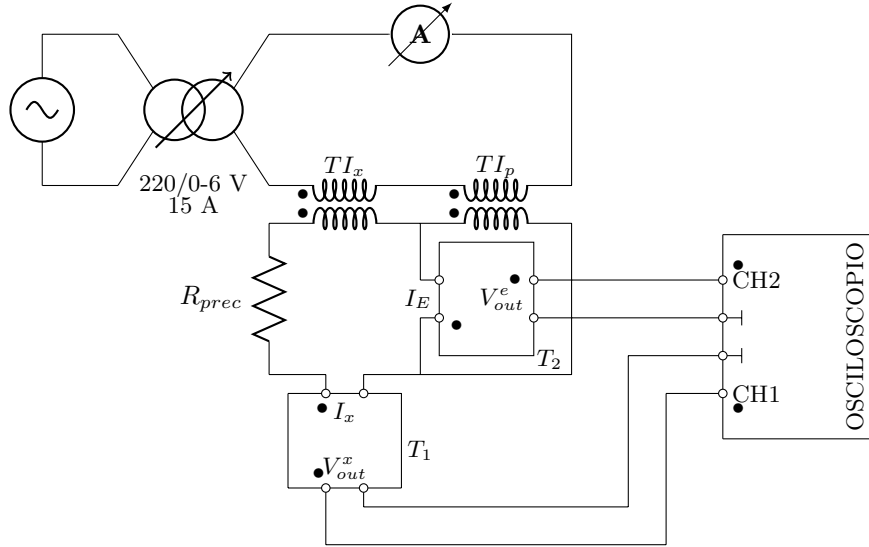
$$\delta(rad) = \frac{U_{E,Q}}{U_x} = \frac{0.0215}{100.68} = 0.06 \text{ crad}$$

**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  $0.1 \Omega$ , 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  $0.1$  y  $0.2 \Omega$ , 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, $0.4 \Omega$

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 ( $\delta$ ), 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:**

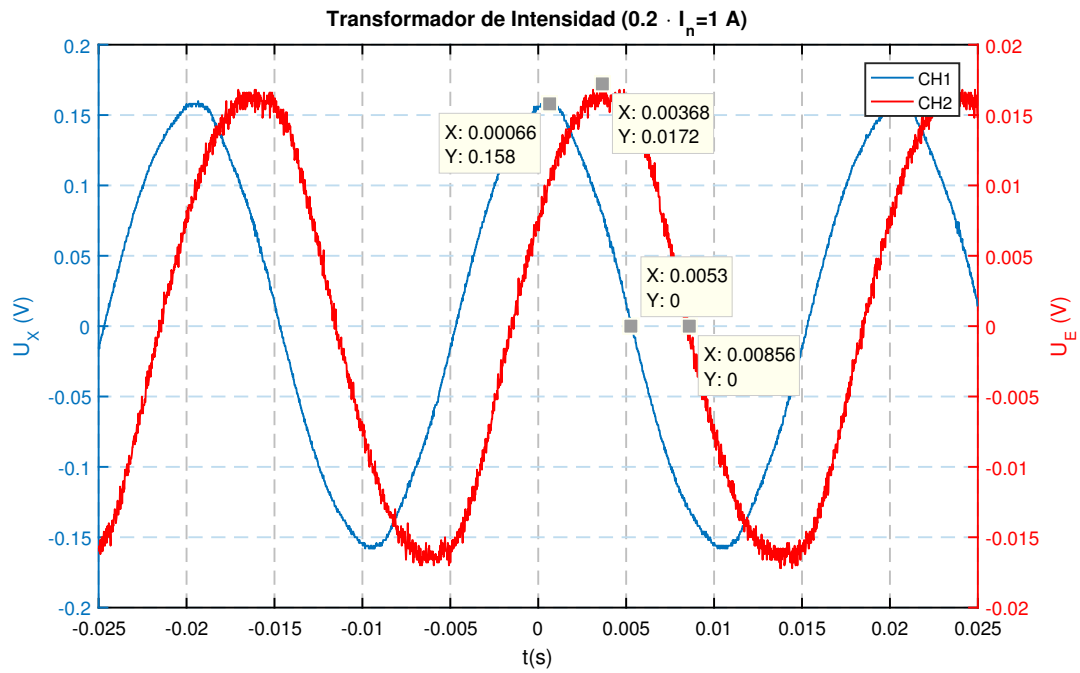
##### **Precisión:**

- 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) $\mu$ 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:  $I_{pn}=6\text{A}(\text{rms})$ ;  $V_{out}$  (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:  $I_{pn}=2\text{A}(\text{rms})$ ;  $V_{out}$  (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.

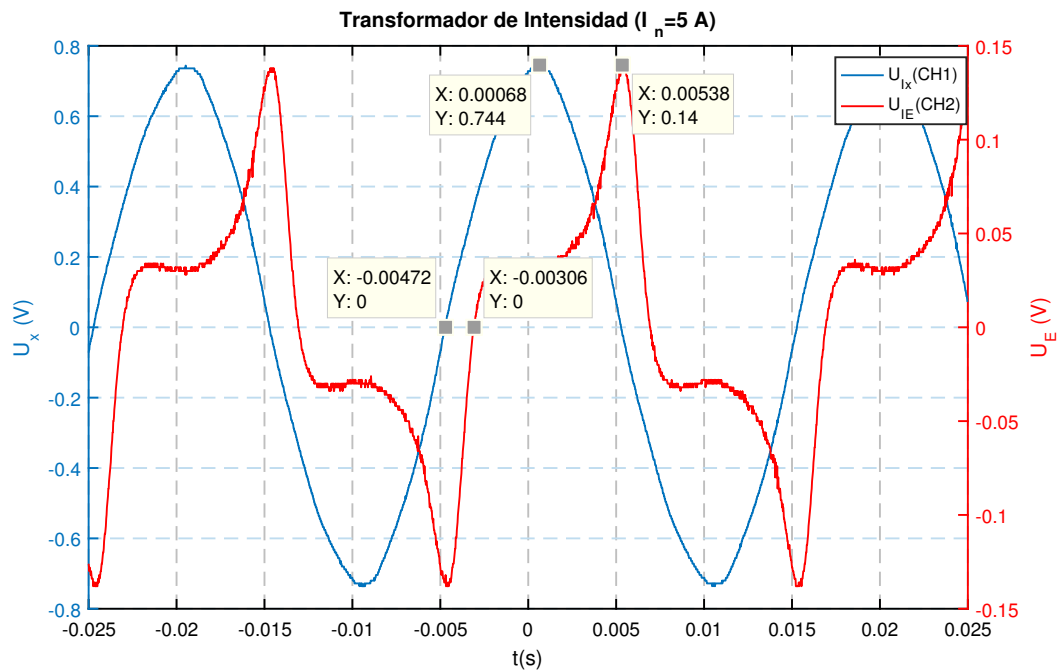
##### **Auxiliares:**

- Autotransformador VARIAC 220V/0-6V; 15A; resolución para entrada 220V: 20mV.
- $R_{prec}$ : Resistencias: 0.1  $\Omega$ , 0.2  $\Omega$ ; 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:

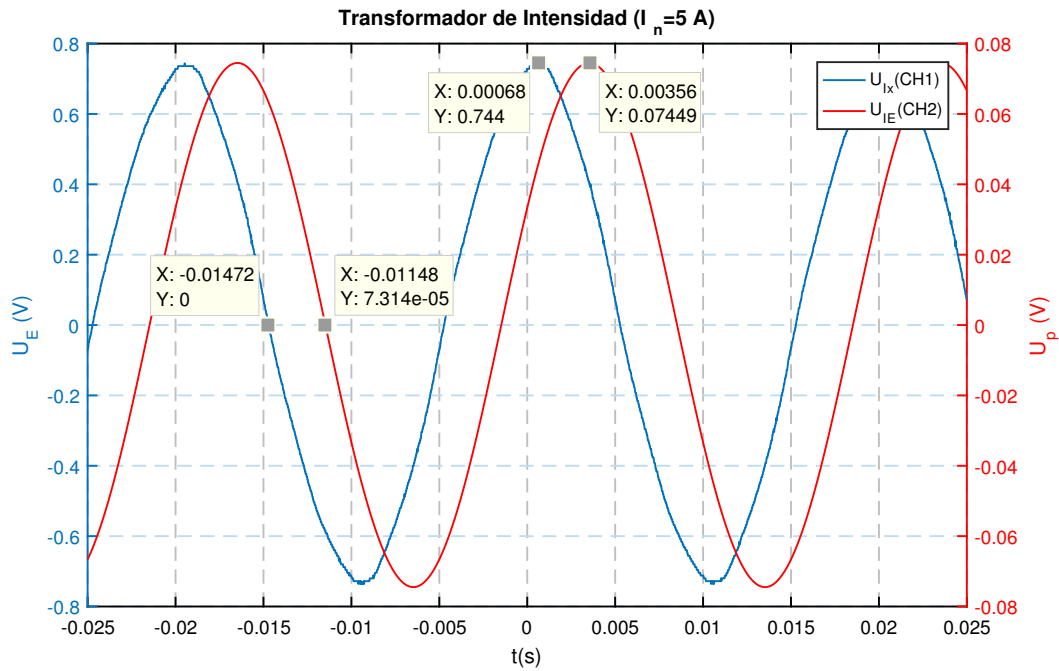


Para el ensayo a la intensidad nominal  $I_n$ , se han obtenido las siguientes medidas en el osciloscopio:





Para eliminar el alto contenido en armónicos se ha aplicado un filtro paso bajo de primer armónico 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 <sup>er</sup> 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.