

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

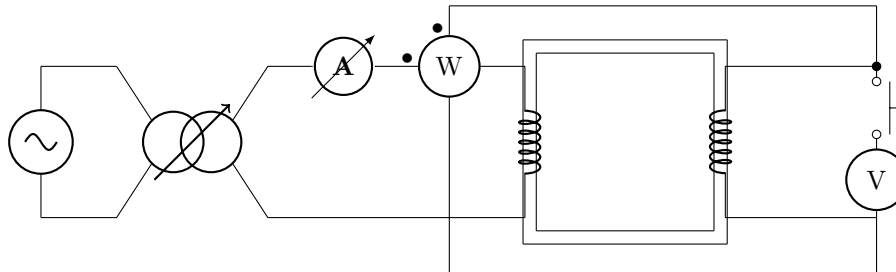
Ignacio Sanz Soriano

18 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. + 3dig. 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} (Ω) 8 MΩ	8 MΩ	8 MΩ	8 MΩ	8 MΩ	8 MΩ	8 MΩ	8 MΩ	8 MΩ	8 MΩ	8 MΩ
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
Potencia 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:

$$P_{vw} = \frac{U^2}{R_{vw}}$$

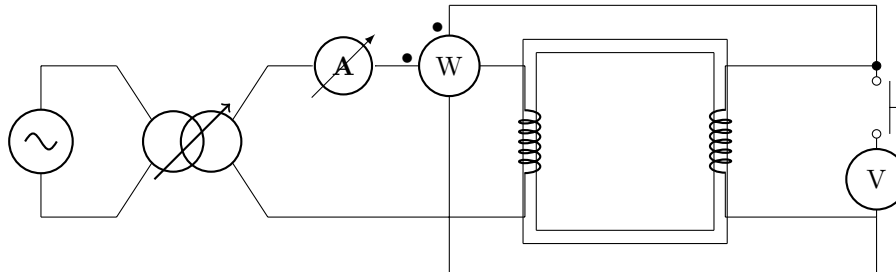
Conclusiones:

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:

$$U_{ef} = 4.44 \cdot N_{int} \cdot f \cdot \hat{B} \cdot S = 4.44 \cdot 700 \cdot 75 \cdot 1.5 \cdot 0.04 \cdot 10^{-2} = 139.9 \text{ V}$$

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:

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

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

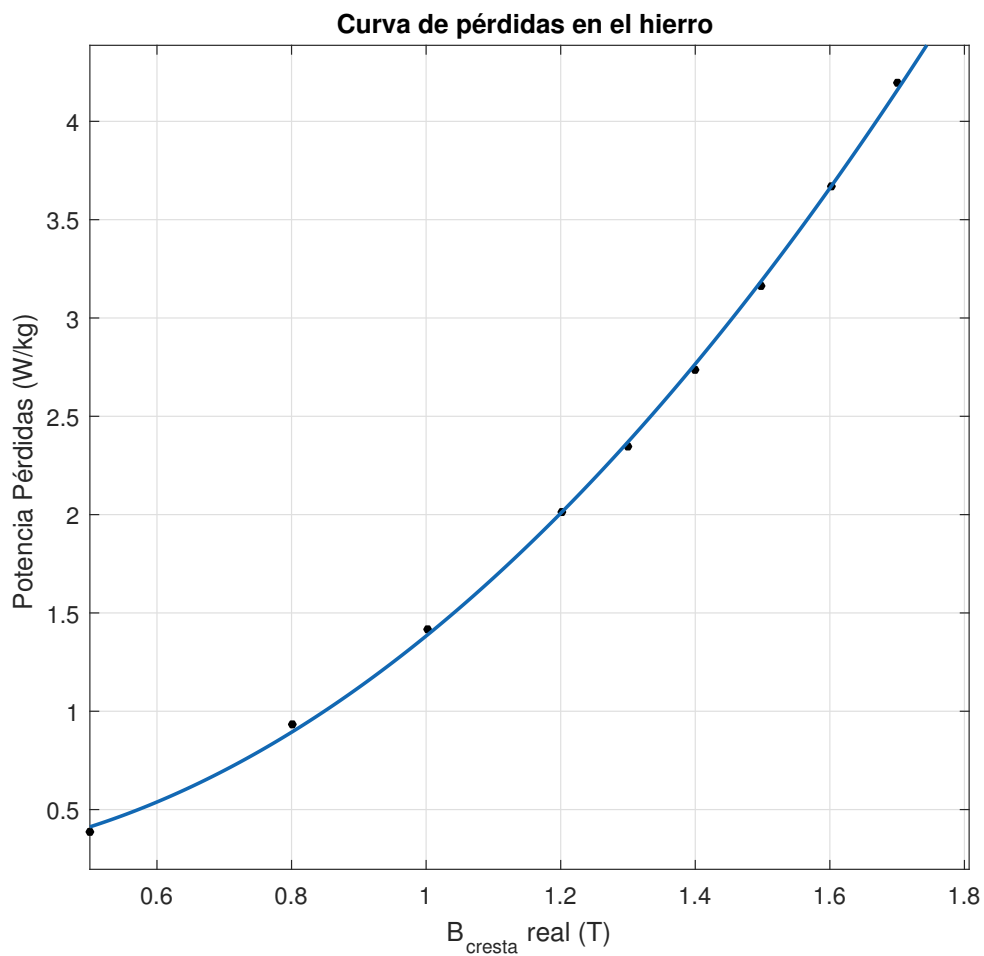
Las pérdidas correspondientes a las **corrientes de Foucault**, serán por lo tanto:

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

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

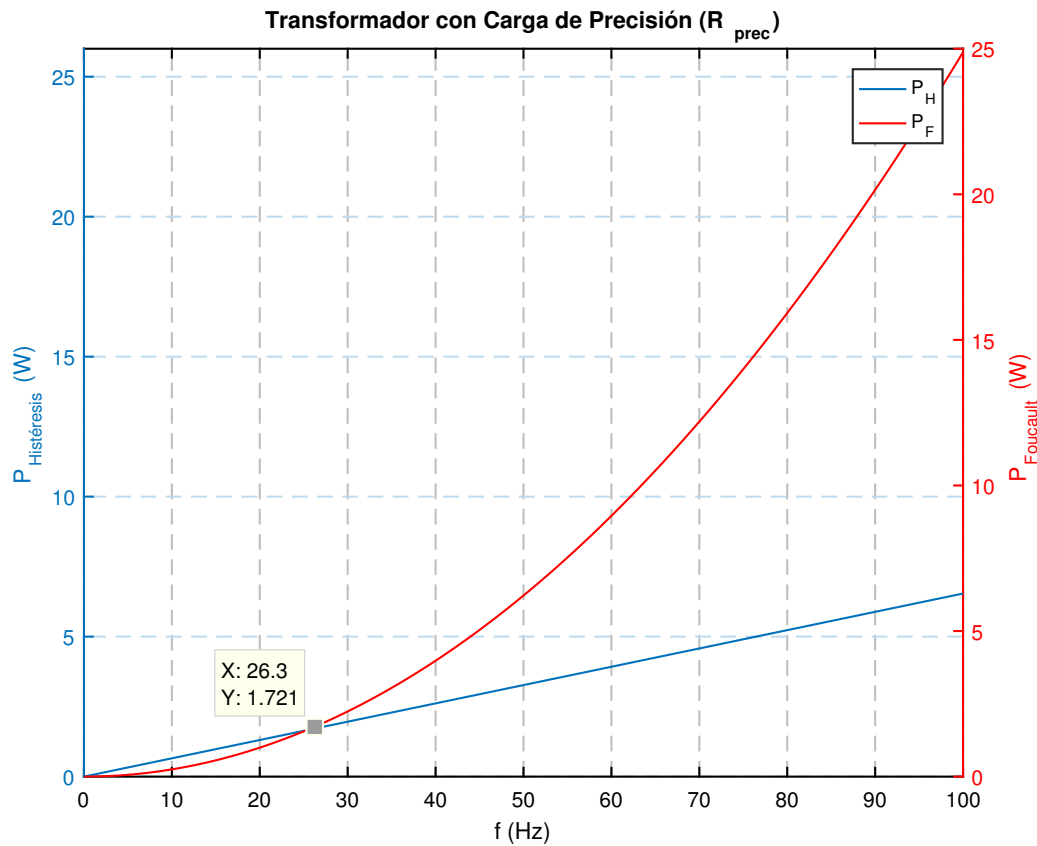
Conclusiones:

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 50Hz por lo que el grueso de las pérdidas se debe a las corrientes de Foucault.