

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

SECCIÓN DE ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA



Laboratorio de Máquinas Eléctricas

Laboratorio N°3

Transformador

Kevin Benites – 20205244

Carlos Granados - 20192468

Salvador Yábar - 20200408

2024-1

1. OBJETIVOS

- Realizar el cableado del transformador e instrumentos de medición.
- Configurar el transformador según requerimiento.
- Medir parámetros eléctricos del transformador en operación y en ensayos.
- Realizar configuración del ensayo de vacío a condiciones del ensayo.
- Realizar configuración del ensayo de cortocircuito a condiciones del ensayo.
- Plantear el circuito equivalente del transformador a partir de la medición de resistencia y los ensayos de vacío y cortocircuito.
- Definir el ensayo regulación del transformador.

2. ENSAYO DE RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN

El ensayo de relación de transformación nos permite evidenciar cómo se relaciona la tensión del primario con la del secundario. La teoría señala que este valor debería ser de 2, en las mediciones se tiene un promedio de 2.012, lo cual se acerca bastante al valor esperado.

V_1 (V)	V_2 (V)	Relación de transformación (V_1/V_2)
80	39.6	2.020202
160	79.5	2.012579
220	109.5	2.009132
240	119.6	2.006689

Tabla 1. Ensayo de relación de transformación

3. RESISTENCIA DE LOS BOBINADOS

Se midieron las resistencias en los terminales señalados. Como los valores son reducidos, hay que considerar la resistencia del cable, la cual es 0.1 Ω . También, se debe referir las resistencias a 75°C, la temperatura de trabajo.

Bobina	Terminales	Resistencia (Ω)
Alta Tensión	A - B	0.7
Baja Tensión	a ₁ - b ₄	0.3

Tabla 2. Medición de resistencia de los bobinados

A partir de la tabla 2, obtenemos las resistencias referidas a la temperatura de trabajo mediante la siguiente ecuación:

$$R_{ajustada} = R_{medida} \times \left(1 + \alpha \times (T_{trabajo} - T_{referencia})\right)$$

Ecuación 1. Resistencia referida a temperatura de trabajo

Considerando el coeficiente de temperatura del cobre: $\alpha = 0.00392 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ y $T_{referencia} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Bobina	Terminales	Resistencia referida (Ω)
Alta Tensión	A - B	0.7176
Baja Tensión	a ₁ - b ₄	0.2392

Tabla 3. Resistencia referida de los bobinados

4. ENSAYO DE VACÍO

Se realizan las mediciones del ensayo de vacío a distintas tensiones del primario. Si bien el ensayo de vacío se realiza a tensión nominal, se realizan varios ensayos para poder determinar la curva de Potencia de pérdidas en el hierro vs tensión en el primario.

V ₁ (V)	I ₀ (A)	P ₀ (W)	S ₀ (VA)	Cos ϕ
50	0.0461	0.8	2.3	0.3288
100	0.0884	2.8	8.8	0.3133
150	0.1377	5.9	20.8	0.2853
200	0.2015	10.3	40.5	0.2537
220	0.2326	12.4	51.3	0.2417
240	0.2713	14.9	65.3	0.2287

Tabla 4. Ensayo de vacío

5. ENSAYO DE CORTOCIRCUITO

Se realizan las mediciones del ensayo de cortocircuito a distintas corrientes del primario. Se realizan varios ensayos para poder determinar la curva de Potencia de pérdidas en el cobre vs corriente de cortocircuito en el primario.

V_{cc} (V)	I_{cc1} (A)	I_{cc2} (A)	P_{cc} (W)	S_{cc} (VA)	$\cos \phi$
1.97	1	2	1.9	1.9	0.9815
4.17	2	4.23	8.6	8.7	0.9815
5.99	3	6.05	17.7	18	0.9815
8.04	4	8.2	31.7	32.4	0.9814
9.07	4.5	9.1	40.4	41.2	0.9816
10.02	5	10.05	49.1	50.1	0.9815

Tabla 5. Ensayo de cortocircuito

6. ENSAYO CON CARGA

Empleando la función polyfit de MATLAB, se consigue una aproximación cuadrática para la relación entre P_o y V_o (ensayo de vacío), y P_{cc} e I_{cc} (ensayo de cortocircuito).

$$P_o(V_o) = 0.0003V_o^2 - 0.0004V_o + 0.2198 \text{ W}$$

Ecuación 2. Potencia de pérdidas en el hierro

$$P_{cc}(I_{cc}) = 1.8849I_{cc}^2 + 0.4937I_{cc} - 0.3442 \text{ W}$$

Ecuación 3. Potencia de pérdidas en el cobre

Para la potencia de pérdidas totales, se suman las pérdidas en el hierro y las pérdidas en el cobre:

$$P_{PT} = P_{FE} + P_{CC}$$

Ecuación 4. Potencia de pérdidas totales

Finalmente, para la potencia en el secundario, se considera la diferencia de la Potencia activa medida y la potencia de pérdidas totales calculada:

$$P_2 = P_{act} - P_{PT}$$

Ecuación 5. Potencia en el secundario

Estas ecuaciones fueron colocadas en una hoja de cálculo para obtener los resultados, los cuales se presentan en las tablas siguientes.

6.1 ENSAYO CON CARGA RESISTIVA

V_1 (V)	I_1 (A)	V_2 (V)	I_2 (A)	P_{FE} (W)	$P_{CC1} + P_{CC2}$ (W)	P_{PT} (W)	P_{act} (W)	S (VA)	$\cos \phi$	P_2 (W)
220	1.13	108.3	2.133	14.652	2.621	17.272	244.8	249.8	0.9801	227.528
219.45	2.192	107	4.29	14.580	9.795	24.374	478.3	480.9	0.99	453.926
218.69	3.415	105.8	6.77	14.480	23.324	37.804	745	746.9	0.9975	707.196
218.3	4.504	104.3	8.98	14.429	40.117	54.545	981.6	983.2	0.9984	927.055

Tabla 6. Ensayo con carga resistiva

6.2 ENSAYO CON CARGA INDUCTIVA

V_1 (V)	I_1 (A)	V_2 (V)	I_2 (A)	P_{FE} (W)	$P_{CC1} + P_{CC2}$ (W)	P_{PT} (W)	P_{act} (W)	S (VA)	$\cos \phi$	P_2 (W)
220.32	1.172	109.1	1.903	14.694	2.823	17.517	27.7	258.1	0.1074	10.183
219.13	2.221	108.5	4.039	14.538	10.050	24.588	58.2	486.7	0.1195	33.612
219.3	3.368	107.9	6.33	14.560	22.700	37.260	106.3	738.6	0.1439	69.040
219.02	4.49	107.5	8.64	14.523	39.872	54.395	167.2	983.5	0.17	112.805

Tabla 7. Ensayo con carga inductiva

6.3 ENSAYO CON CARGA CAPACITIVA

V_1 (V)	I_1 (A)	V_2 (V)	I_2 (A)	P_{FE} (W)	$P_{CC1} + P_{CC2}$ (W)	P_{PT} (W)	P_{act} (W)	S (VA)	$\cos \phi$	P_2 (W)
220.42	1.023	109.7	2.508	14.707	2.133	16.841	16.8	225.6	0.0796	-0.041
221.13	2.279	110.3	5.036	14.801	10.571	25.372	28.6	504	0.0568	3.228
221.43	2.925	110.5	6.33	14.841	17.226	32.067	37.1	647.8	0.0572	5.033
220.59	4.148	110.4	8.83	14.730	34.135	48.865	57	915.1	0.0623	8.135

Tabla 8. Ensayo con carga capacitiva

7. ENSAYO DE REGULACIÓN

V_1 (V)	I_1 (A)	V_2 (vacío)	V_2 (nominal)	I_2 (A)	r
218.3	4.504	219.76	221	8.98	0.56%

Tabla 9. Ensayo de regulación

8. EFICIENCIA

La eficiencia es un parámetro importante pues determina la cantidad de energía que se pierde durante la conversión de corriente alterna, lo que impacta directamente en el rendimiento y el costo operativo del transformador. Para calcularlo, se tuvo que obtener la potencia de pérdidas en el hierro y en el cobre, mediante los ensayos de cortocircuito y de vacío.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{P_2}{P_2 + P_{FE} + P_{Cu}} \cdot 100\%$$

Para el cálculo de la eficiencia, se toma el menor resultado para los ensayos con carga resistiva. Este se da con una corriente en el primario de 1.13 A.

Se tiene:

$$\eta = \frac{227.528}{227.528 + 14.652 + 2.621} \cdot 100\% = 92.94\%$$

9. GRÁFICOS

Con los datos del ensayo de vacío, se creó un programa en MATLAB para obtener un ajuste cuadrático de la relación entre Vo y P1. A partir de este, se graficaron los resultados.

```
1 % Datos
2 Vo = [50, 100, 150, 200, 220, 240];
3 P1 = [0.8, 2.8, 5.9, 10.3, 12.4, 14.9];
4
5 % Ajuste de una ecuación polinómica de grado 2
6 p = polyfit(P1, Vo, 2)
7 % Crear puntos para trazar la línea ajustada
8 P1_fit = linspace(min(P1), max(P1), 100);
9 Vo_fit = polyval(p, P1_fit); % Calcular los valores ajustados
10
11 % Graficar
12 plot(P1, Vo, '*', 'MarkerSize', 5); % Graficar puntos
13 hold on;
14 plot(P1_fit, Vo_fit, 'LineWidth', 2); % Graficar la línea ajustada
15 hold off;
16
17 % Configuración de la gráfica
18 title('Vo vs P1');
19 xlabel('Potencia (W)');
20 ylabel('Voltaje en vacío (V)');
21 legend('Datos', 'Ajuste Polinómico');
22
```

Command Window

p =

-0.5981 22.3657 36.7750

Gráfico 1. Código de MATLAB para graficar la curva Vo vs P1

$$f(x) = -0.5981 \cdot x^2 + 22.3657 \cdot x + 36.775$$

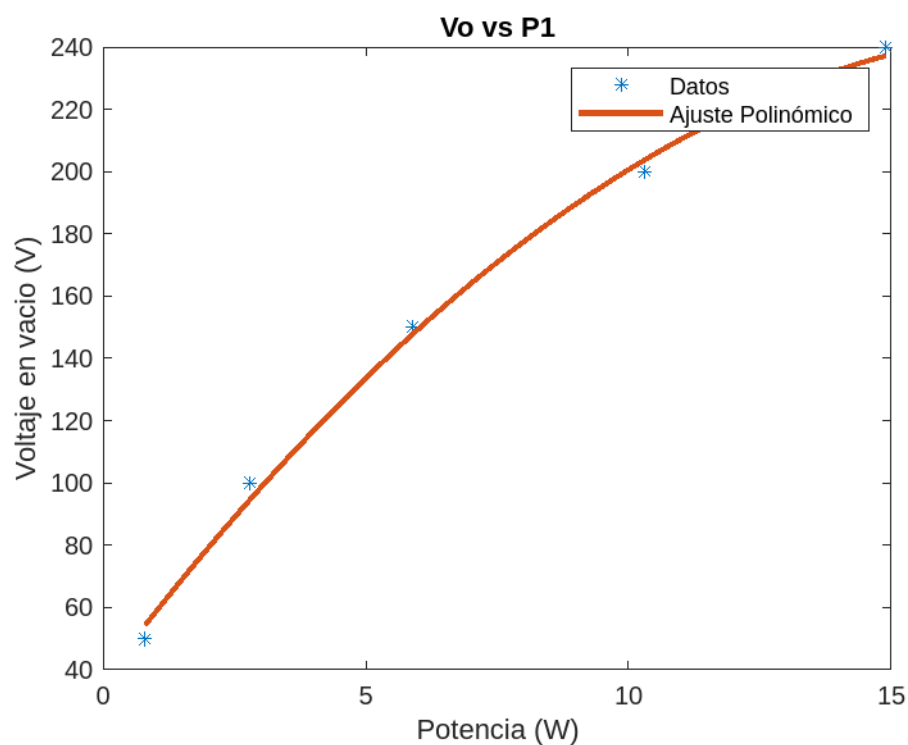


Gráfico 2. Curva Vo vs P1

De manera similar, empleando los datos del ensayo de cortocircuito, se grafica la curva Icc vs P1.

```

1 % Datos
2 Icc = [1, 2, 3, 4, 4.5, 5];
3 P1 = [1.9, 8.6, 17.7, 31.7, 40.4, 49.1];
4
5 % Ajuste de una ecuación polinómica de grado 2
6 p = polyfit(P1, Icc, 2)
7 % Crear puntos para trazar la línea ajustada
8 P1_fit = linspace(min(P1), max(P1), 100);
9 Icc_fit = polyval(p, P1_fit); % Calcular los valores ajustados
10
11 % Graficar
12 plot(P1, Icc, '*', 'MarkerSize', 5); % Graficar puntos
13 hold on;
14 % Graficar la línea ajustada
15 plot(P1_fit, Icc_fit, 'LineWidth', 2);
16 hold off;
17
18 % Configuración de la gráfica
19 title('Icc vs P1');
20 xlabel('Potencia (W)');
21 ylabel('Corriente de cortocircuito (A)');
22 legend('Datos', 'Ajuste Polinómico');

```

Command Window

p =

-0.0011 0.1368 0.8275

Gráfico 3. Código de MATLAB para graficar la curva Icc vs P1

$$f(x) = -0.0011 \cdot x^2 + 0.1368 \cdot x + 0.8275$$

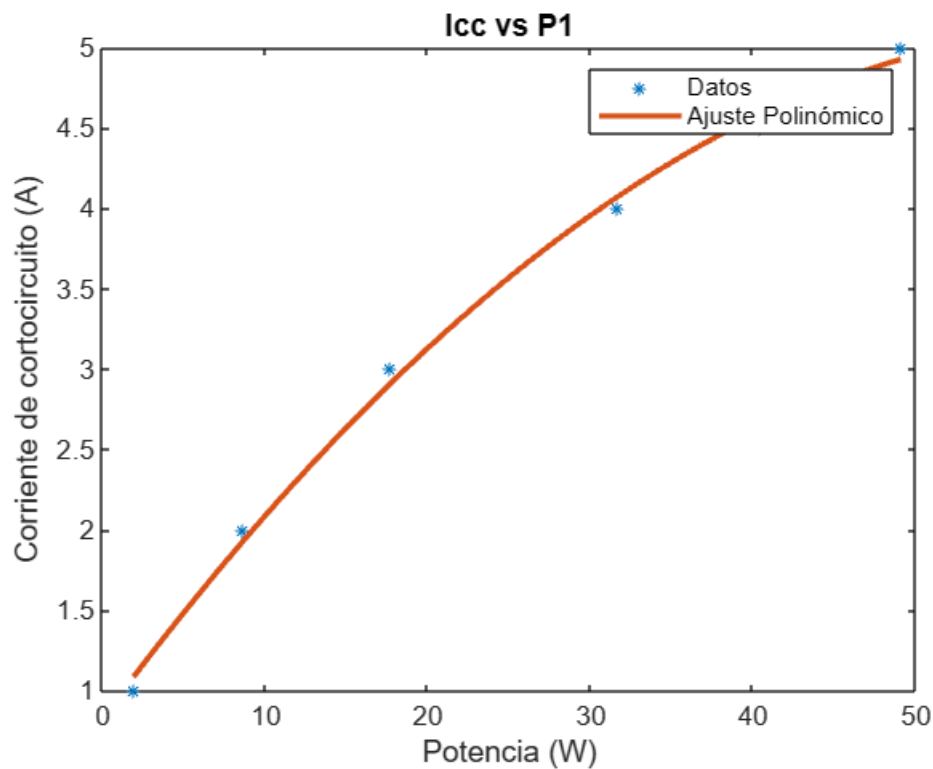


Gráfico 4. Curva Icc vs P1

10. CIRCUITO EQUIVALENTE

Cálculos a mano:

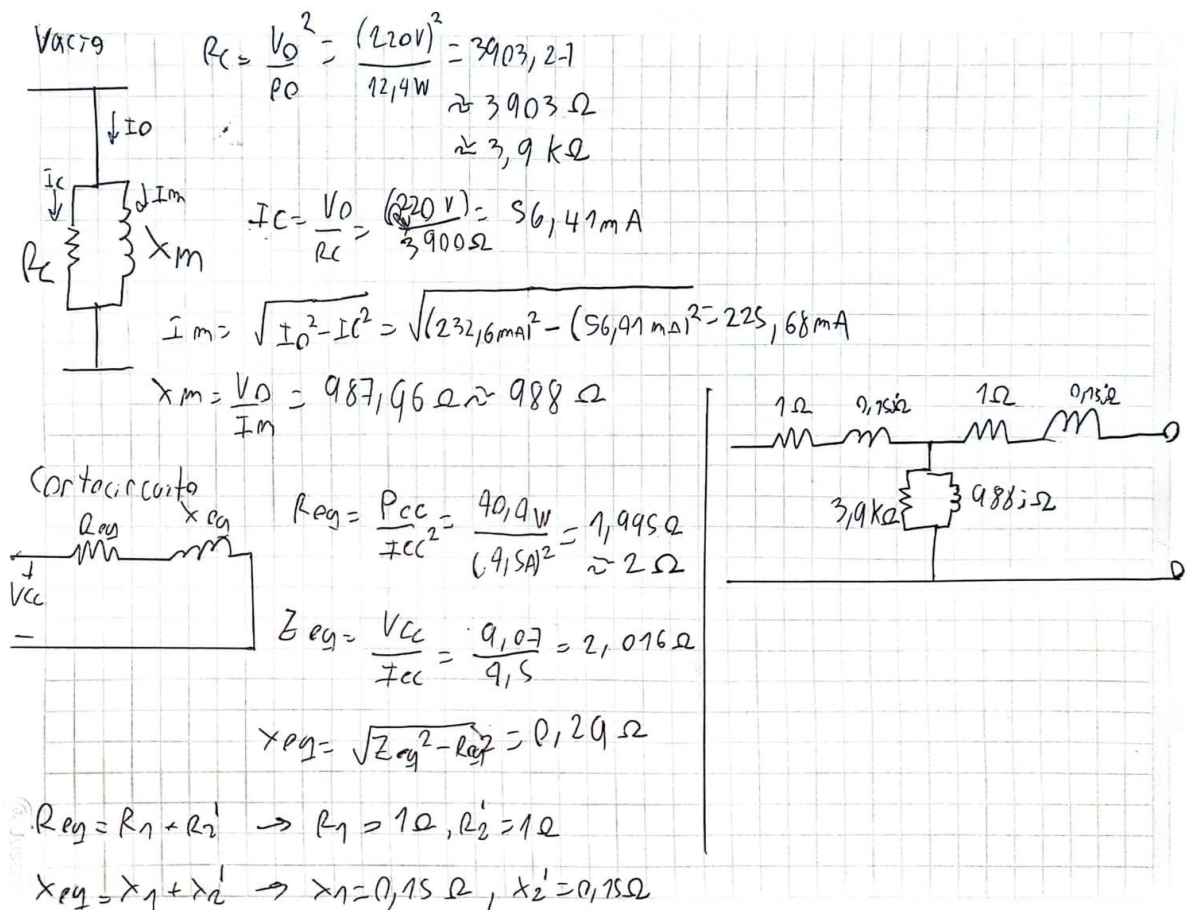


Gráfico 5. Cálculos del circuito equivalente

De la hoja de calculo:

A	B	C	D	E	F
S (VA)	V1	V2	f	a = V1/V2	IN1
1000	220	110	60	2	4,5000
V0 = VN	I0 (mA)	P0			
220	232,6	12,4			
Vcc	Icc = VN	Pcc			
9,07	4,5000	40,4			
Rc=V0^2/P0 (ohm)	Ic=V0/Rc (mA)	Im=rc(I0^2-Ic^2) (mA)	Xm=V0/Im (ohm)		
3903,225806	56,3636	225,6676771	974,884852		
Req=Pcc/Icc^2	Zeq=Vcc/Icc	Xeq=rc(Zeq^2-Req^2)			
1,9951	2,0156	0,2867			

1.

Gráfico 6. Hoja de cálculo del circuito equivalente

Enlace a la hoja de cálculo (para la obtención de la corriente se asume tensión nominal en el primario)

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1AhCzllL1Fq2eAuaCuPFjlwxWQwOZjppFN9Gj6Z98maU/edit?usp=sharing>

11. CONCLUSIONES

Se realizó el cableado del transformador para los ensayos de vacío, cortocircuito, y regulación, conectando los instrumentos de medición de manera adecuada para medir los parámetros necesarios para cada ensayo.

Se determinaron las resistencias referidas a la temperatura de trabajo mediante el uso de la fórmula, empleando el coeficiente de temperatura del cobre, y asumiendo una temperatura referencial de 25 grados.

Además de realizar los ensayos de vacío y cortocircuito para los valores nominales, estos también se realizaron para distintas tensiones y corrientes. El objetivo de esto fue obtener puntos para estimar las curvas de potencia pérdida en el hierro en función a la tensión, y potencia pérdida en el cobre en función a la corriente. A partir de estas curvas, se pudo obtener el valor de la potencia total de pérdidas para los ensayos con carga. Hallar este valor permitió obtener la potencia del secundario, observando que esta siempre era menor que la potencia del primario.

El ajuste cuadrático se emplea en gráficos de voltaje de vacío vs. potencia y corriente de cortocircuito vs. potencia en ensayos de transformadores debido a múltiples razones: para modelar con mayor precisión la curva de comportamiento de voltaje o corriente en función de la potencia en ensayos de vacío y cortocircuito, donde los datos experimentales suelen no seguir una relación lineal simple; para proporcionar una estimación más precisa de los parámetros del sistema, crucial en la caracterización de transformadores donde pequeñas desviaciones pueden tener un gran impacto en el rendimiento del dispositivo; para capturar mejor las no linealidades y variaciones en los datos que un ajuste lineal no podría, otorgando flexibilidad en la modelización de una amplia gama de comportamientos del transformador; y para permitir una interpolación y extrapolación más precisa del comportamiento del transformador en condiciones de funcionamiento fuera del rango de datos experimentales.

En los ensayos de vacío y cortocircuito de un transformador, las curvas de voltaje de vacío vs. potencia y corriente de cortocircuito vs. potencia muestran comportamientos específicos. En el ensayo de vacío, donde se mide el voltaje aplicado al transformador mientras se mantiene la corriente mínima, se espera un aumento del voltaje con la

potencia aplicada debido a las pérdidas en el núcleo y el bobinado, mostrando una tendencia creciente con posibles no linealidades y saturación. Por otro lado, en el ensayo de cortocircuito, donde se aplica una carga que provoca un cortocircuito en los terminales secundarios, se anticipa un aumento proporcional en la corriente de cortocircuito con la potencia aplicada debido a la mayor tensión inducida y la menor impedancia del circuito, aunque puede alcanzar un límite máximo en algunos casos debido a las características del transformador o la capacidad de la fuente de alimentación. En conjunto, estas curvas reflejan las propiedades del transformador bajo diversas condiciones de carga y operación, siendo cruciales para comprender y caracterizar su rendimiento en aplicaciones prácticas.

Respecto al circuito equivalente, es evidente que existirá cierto porcentaje de error en los cálculos debido a las aproximaciones y las pérdidas de potencia

12. VIDEO

El video se encuentra disponible en el siguiente enlace:

<https://drive.google.com/file/d/1EILfdYyCAIYhWuSGtQWihw1LWvfUYCSv/view?usp=sharing>