

PERDIDAS DE POTENCIA EN EL TRANSFORMADOR

Luis Zhunio, Adrián Moscoso, Kevin Jaramillo

Universidad Politécnica Salesiana

lzhunio@est.ups.edu.ec

amoscoso@est.ups.edu.ec

kjaramillo@est.ups.edu.ec

RESUMEN

En el transformador monofásico real se pueden apreciar grandes diferencias con respecto al transformador ideal; estas consideraciones vienen dadas por los efectos que aparecen al momento de implementarlo. A parte de que se conoce claramente que ningún modelo cumple al 100% con lo calculado, es decir, que es una aproximación a la realidad, aparecen efectos en el circuito magnético y circuito eléctrico que causan que el modelo se vea aún más afectado. El hecho de que estos efectos causen pérdidas de potencia afecta directamente a la eficiencia total del transformador por el hecho de que depende de la potencia de ingreso y de la potencia de salida, es decir, a menos potencia de salida; menor eficiencia del transformador. Dichos efectos se presentan en el siguiente documento junto con las posibles soluciones a los mismos.

• *Introducción*

Las pérdidas de potencia en un transformador real, son un tema muy crítico y complicado, dichas pérdidas han sido estudiadas por años y años, llegando a la conclusión de que es imposible no tener pérdidas en un transformador; es por esto que ahora lo que se pretende lograr es reducir las pérdidas lo máximo posible.

Un transformador real tiene pérdidas por diferentes circunstancias, no solo por una, y sin embargo todas se manifiestan en forma de calor, es decir si un transformador tiene pérdida de potencia esta pérdida se transformara en calor, este

es el principio de la conservación de energía.

Con el fin de tratar de reducir las pérdidas de potencia lo máximo posible, sea estudiado cuales son las causas por las que se producen estas pérdidas y así hacer algo al respecto y tomar una medida adecuada y oportuna que permita una solución al problema; esta solución claramente no será una solución totalmente exitoso pero lograra una mejora muy considerable.

Debido a las pérdidas de potencia es que cada transformador, debe tener su factor de potencia establecido por el fabricante, para así poder ver cuál es un transformador con bajas perdidas y cual es un transformador con altas perdidas, para así poder adquirir uno de estos según las circunstancias que se necesiten.

• *Desarrollo de contenidos*

Pérdidas de potencia

Para analizar las pérdidas de potencia en un transformador es muy conveniente analizar al circuito magnético y el circuito eléctrico por separado, puesto que cada uno de ellos presenta pérdidas por circunstancia totalmente diferentes.

Circuito magnético

El circuito magnético está relacionado con el núcleo del transformador y con el flujo inducido por el circuito eléctrico que analizaremos después.

Las pérdidas producidas en un transformador por el circuito magnético son constantes, es decir estas no cambian por la carga, por la corriente en el bobinado, por las voltajes o por el número de espiras, puesto que el flujo magnético es constante y depende únicamente del material que obviamente ya está construido y no sufrirá ninguna modificación durante su funcionamiento.

Las pérdidas producidas en el circuito magnético del transformador son las siguientes:

- Flujos dispersos
- Ciclo de histéresis
- Corrientes parasitas

Flujos dispersos

Como ya sabemos en el núcleo del transformador se produce un flujo magnético debido a la inducción magnética producida, dicho flujo circula por el núcleo, y en su trayecto en un transformador real este se dispersa en pequeñas cantidades dependiendo de la forma del núcleo, produciendo una pérdida de potencia, puesto que el flujo inducido no llega totalmente al segundo devanado si no que una parte de este se pierde en el trayecto.

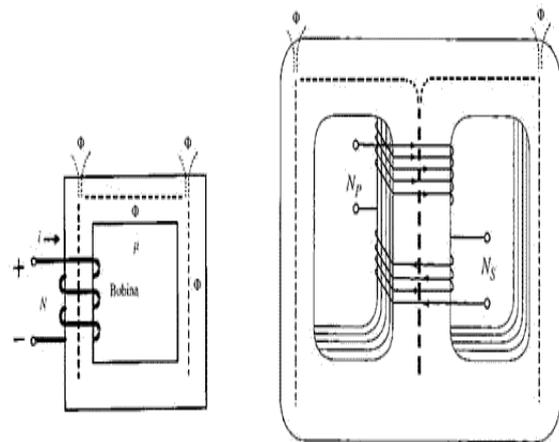
Estas pérdidas generalmente se producen en los bordes del núcleo magnético.

Solución:

Si tomamos en cuenta que el flujo circula por el núcleo, y que este flujo al encontrarse con un borde, parte de este se dispersa; la principal solución sería un diseño adecuado del núcleo para evitar que una gran cantidad de flujo se encuentre con un borde; sino más bien darle al flujo otras opciones de trayectoria para que el flujo se divida, y que este flujo ya dividido se encuentre con un borde,

dando así lugar a una menor dispersión del flujo.

Para poder entender mejor lo mencionado anteriormente utilizaremos como ejemplo dos transformadores con diferentes diseños y analizaremos que es lo que sucede con el flujo disperso en cada uno:



El primer transformador tiene un diseño que comúnmente es llamado transformador a columnas, en este como se puede ver en la figura el flujo inducido se dispersa en los bordes que son bordes a 90°, donde se pierde gran cantidad de flujo debido a la gran cantidad de flujo que pasa por dicho borde.

El segundo transformador de núcleo acorazado es un diseño muy adecuado para tener bajas pérdidas por los flujos dispersos. Esto se debe a que el flujo inducido se divide en dos, y cuando el flujo ya está dividido pasa por un borde que no es recto sino un poco ovalado para evitar que una gran parte de flujo se disperse.

Es por esta razón que para reducir las pérdidas por flujos dispersos la mejor solución es un muy buen diseño del núcleo del transformador.

Ciclo de histéresis

Debido a que el núcleo del transformador está pertenece a los material

ferromagnéticos se presentan la pérdida de potencia producida por el ciclo de histéresis.

El ciclo de histéresis se puede explicar entendiendo que el núcleo del transformador se encuentra ubicado dentro del campo magnético generado por el mismo y, en consecuencia, se imanta. Pero, ocurre que la corriente aplicada al transformador es alternada y, por tanto, invierte constantemente su polaridad, variando con la misma frecuencia el sentido del campo magnético, entonces las moléculas del material que forman el núcleo deben invertir en igual forma su sentido de orientación, lo cual requiere energía, que es tomada de la fuente que suministra la alimentación; lo cual representa, una pérdida de potencia.[2]

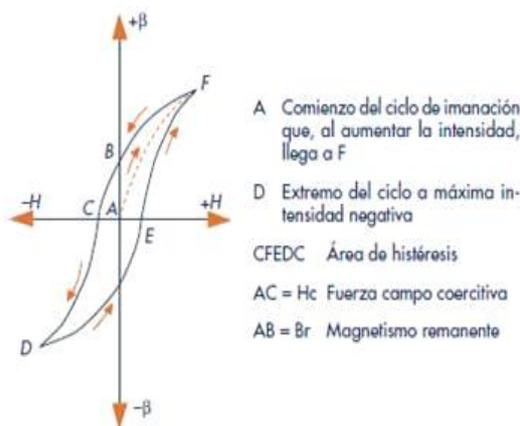


fig. gráfica del ciclo del ciclo de Histéresis[3]

Solución:

La solución para este problema que presentan los materiales ferromagnéticos que es el ciclo de histéresis es la calidad del material. La calidad del material depende de la capacidad de imantarse y desimantarse fácil y rápidamente, y que su costo sea muy accesible; puesto que el oro presenta esta característica, pero es muy caro, y por ser demasiado caro se constituye en material descartado para

construir los núcleos de los transformadores.[2]

Un material que presenta la característica de imantarse y desimantarse fácil y rápidamente y que por su puesto se precio no es caro es el hierro silicio. Un tipo especial de hierro obtenido a partir de la introducción de silicio en el proceso de fabricación es el hierro eléctrico. Éste tipo de hierro exhibe ciertas propiedades magnéticas que lo hacen ideal para el uso en transformadores, generador y motores eléctricos. Se distinguen dos tipos de este tipo de material: de grano orientado y grano no-orientado[2]

A continuación se coloca una tabla con los parámetros de algunos materiales para conocer su ciclo de histéresis:

Nombre	Composición %	μ_r máxima	H_c A.v/m	B_r Tesla	Resistividad $\Omega \cdot m \times 10^{-8}$
Hierro	99,9 Fe	5.000	80	2,15	10
Hierro al silicio	4 Si; 96 Fe	7.000	48	1,97	59
Hierro al silicio	3,3 Si; 96,7 Fe	10.000	16	2	50
Permalloy	45 Ni; 54 Fe	25.000	24	1,6	50
Mumetal	75 Ni; 2 Cr; 5 Mn; 18 Fe	110.000	2,4	0,72	60

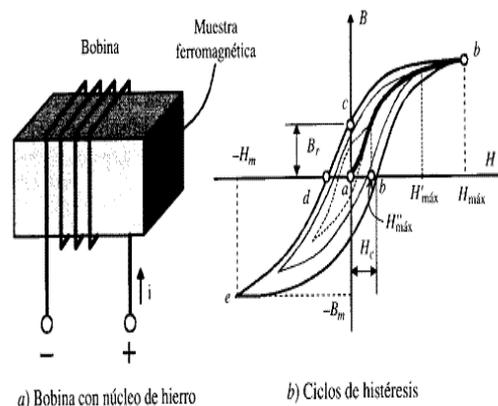
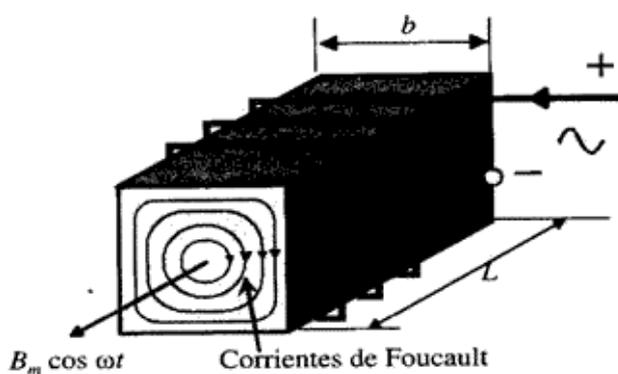


fig. Parámetros para conocer el ciclo de histéresis de algunos materiales. [3]

Corrientes parásitas

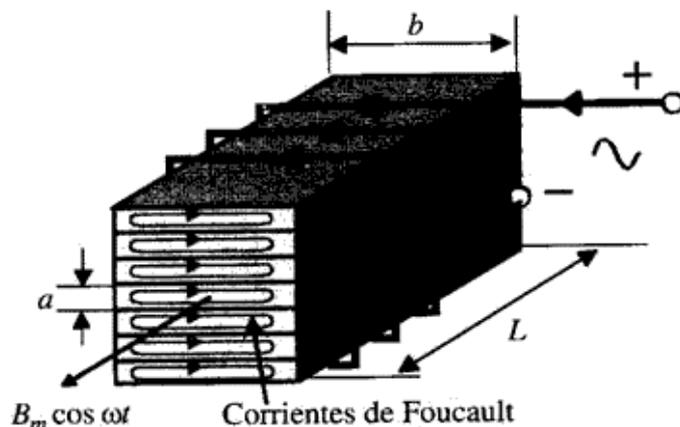
Cuando en un transformador se induce un campo magnético, por la ley de Faraday aparece en el material también una fem inducida la cual da lugar a unas corrientes parásitas que circularan por el material.

Para entender mejor lo explicado miremos el siguiente gráfico.



Entonces para reducir al máximo posible las corrientes parásitas hay que aumentar al máximo resistencia.

Para llegar a ofrecer máxima resistencia es posible integrar el núcleo magnético mediante un conjunto de láminas delgadas de hierro, superpuestas una sobre la otra y aisladas entre sí mediante un aislante, esto se ilustra en la siguiente figura:



El núcleo anterior es completamente macizo, donde hay un determinado flujo variable, originándose en dicho núcleo corrientes circulares que se opondrán en todo instante a la causa que las origina, como el núcleo es macizo la resistencia que ofrecerá a dichas corrientes circulares será baja, lo cual provocará el incremento de tales corrientes.

En la figura podemos mirar en forma el efecto de reducción de las corrientes circulares; debido a que el hierro tiene ya menor sección, el valor alcanzado por las corrientes parásitas es ahora menor, y en consecuencia han disminuido las pérdidas.

Debido al incremento de tales corrientes la fuerza magnetizante se debilitará y en consecuencia, provocará un incremento en la corriente que circula por el primario, la cual la obtendrá de la de la fuente que suministra la alimentación, lo cual representa una pérdida de potencia.

Es decir para que las pérdidas se vean muy reducidas por las corrientes parásitas hay que construir el núcleo del transformador en láminas, o enchapado.

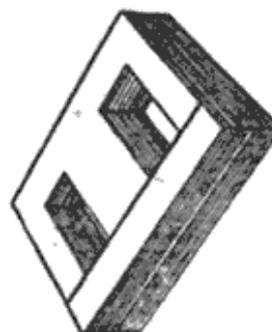
Solución:

Como las corrientes parásitas vienen de:

$$i = \frac{fem}{\delta}$$

$\delta \rightarrow$ representa la resistencia del material ferromagnético (núcleo).

Núcleo laminado diseñado para ser ensamblado fácilmente.



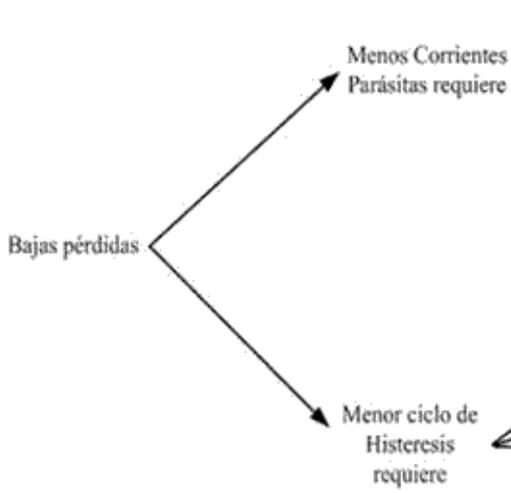
Ya hemos examinado cada una de las pérdidas en el circuito magnético del transformador y se ha dado a conocer cada una de sus mejores soluciones a tomar, a continuación se coloca un cuadro de resumen general.

En el transformador anterior podemos observar que las corriente $i(t)$ pasan por las bobinas con sus respectivas espiras, y es exactamente ahí en las bobinas donde se produce una pérdida de potencia que esta dado por:

$$p = I^2 * ri$$

$ri \rightarrow$ resistencia en las bobinas

$p \rightarrow$ potencia perdida en las bobinas



Entonces para reducir la potencia perdida, es claro que no podemos disminuir la corriente i puesto que esta llega a la carga, entonces lo que podemos hacer es reducir al máximo la resistencia en las bobinas.

Ahora examinemos ri

$$ri = \frac{\varphi * L}{S}$$

$\varphi \rightarrow$ reluctancia propia de cada material

Entonces para disminuir la resistencia en las bobinas el material debe ser un muy buen conductor, y también la sección transversal del mismo debe ser grande.

Circuito eléctrico

El circuito eléctrico está relacionado con el bobinado del transformador, con la carga, con las corrientes y los voltajes, y es por esto mismo que estas pérdidas no son constantes sino que varían según las circunstancias.

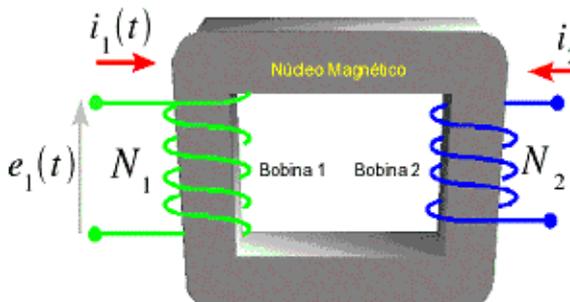
Las pérdidas en el transformador producidas por el circuito eléctrico se deben al bobinado del núcleo el cual examinaremos a continuación:

Solución:

La solución por ende es buscar un material conductor y de sección transversal grande.

Conductividad:

Los requerimientos para los materiales conductores es tener la mayor conductividad posible y el menor coeficiente de temperatura. La variación de la resistencia de acuerdo a la temperatura está dada por:



$$R(T) = R_{20^{\circ}\text{C}} [1 + \alpha (T - 20^{\circ}\text{C})]$$

α es el coeficiente de temperatura

T es la temperatura a la cual se desea evaluar la resistencia

Debido a su alta conductividad eléctrica y excelentes propiedades mecánicas, el cobre es ampliamente usado para la construcción de bobinados. Conductores redondos, recubierto con barniz aislante.

Tabla 1.1. Propiedades del Cobre y Aluminio		
	Cobre	Aluminio
Peso específico (kg/m ³)	8.89	2.70
Punto de fusión (°C)	1083	658
Resistividad @ 20 °C (Ωm)	1.17e-8	2.87e-8
Coefficiente de Temperatura (α)	0.0039	0.004
Coefficiente de Expansión lineal	17e-3	23e-3

El Aluminio es más liviano y barato que el cobre y tiene menor temperatura de fundición

(Fácil de moldear), sin embargo su conductividad es solo un 60% de la conductividad del

Cobre y posee menor rigidez mecánica por lo que no puede ser manufacturado en delgados conductores.

Sección transversal:

Para reducir las pérdidas en el cobre es conveniente que el conductor tenga una gran sección transversal, pero si hacemos esto, será muy complicado manipular el conductor al momento de construir un transformador, por lo que no es muy conveniente que el conductor sea de muy grande sección transversal.

Convencionalmente, los alambres cobre y aluminio están especificados por la American

Wire Gauge (AWG) o la británica Standar Wire Gauge (SWG), sin embargo, actualmente existe una especificación internacional establecida por la International Electrotechnical Comission (IEC 182-1). En la Tabla de abajo está incluida la transformación del numero AWG a pulgadas y milímetros. Adicionalmente se muestra la resistencia en Ohm/m a 20° para cada conductor.

Tabla 1. 3. AWG estándar

Número AWG	Ø [Inch]	Ø [mm]	Ø [mm ²]	Resistencia @20°C [Ohm/m]
1	0.289	7.35	42.4	0.000407
2	0.258	6.54	33.6	0.000513
3	0.229	5.83	26.7	0.000647
4	0.204	5.19	21.1	0.000815
5	0.182	4.62	16.8	0.00103
6	0.162	4.11	13.3	0.00130
7	0.144	3.66	10.5	0.00163
8	0.128	3.26	8.36	0.00206
9	0.114	2.91	6.63	0.00260
10	0.102	2.59	5.26	0.00328
11	0.0907	2.30	4.17	0.00413
12	0.0808	2.05	3.31	0.00521
13	0.0720	1.83	2.62	0.00657
14	0.0641	1.63	2.08	0.00829
15	0.0571	1.45	1.65	0.0104
16	0.0508	1.29	1.31	0.0132
17	0.0453	1.15	1.04	0.0166
18	0.0403	1.02	0.823	0.0210
19	0.0359	0.912	0.653	0.0264
20	0.0320	0.812	0.518	0.0333
21	0.0285	0.723	0.410	0.0420
22	0.0253	0.644	0.326	0.0530
23	0.0226	0.573	0.258	0.0668
24	0.0201	0.511	0.205	0.0842
25	0.0179	0.455	0.162	0.106
26	0.0159	0.405	0.129	0.134
27	0.0142	0.361	0.102	0.169
28	0.0126	0.321	0.0810	0.213
29	0.0113	0.286	0.0642	0.268
30	0.0100	0.255	0.0509	0.339
31	0.00893	0.227	0.0404	0.427
32	0.00795	0.202	0.0320	0.538
33	0.00708	0.180	0.0254	0.679
34	0.00631	0.160	0.0201	0.856
35	0.00562	0.143	0.0160	1.08
36	0.00500	0.127	0.0127	1.36
37	0.00445	0.113	0.0100	1.72
38	0.00397	0.101	0.00797	2.16
39	0.00353	0.0897	0.00632	2.73
40	0.00314	0.0799	0.00501	3.44

Eficiencia de un transformador

La eficiencia de un transformador está dada por:

La potencia nominal viene indicada por el fabricante en cada transformador junto con su eficiencia, es decir si utilizamos el transformador a una potencia menor a la nominal, estaremos utilizando mal al transformador porque lo estaríamos utilizando ineficientemente.

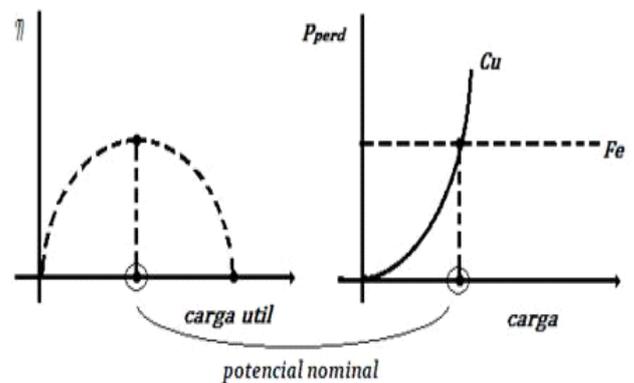
Se denominan Transformadores de alta eficiencia a aquellos transformadores que tienen pérdidas muy por debajo de los convencionales.

La eficiencia de un Transformador depende de su dimensionamiento y de la calidad de los materiales utilizados en su fabricación.

Los transformadores de mayor rendimiento tienen núcleos fabricados con acero al silicio de bajas pérdidas con las bobinas de cobre o núcleos de acero amorfo con devanados de cobre.

Potencia nominal

La potencia nominal es la potencia máxima que demanda un aparato en condiciones de uso normales; esto quiere decir que el aparato está diseñado para soportar esa cantidad de potencia, sin embargo debido a fluctuaciones en la corriente, al uso excesivo o continuo, o en situaciones de uso distintas a las del diseño, la potencia real puede diferir de la nominal, siendo más alta o más baja.



Perdidas de potencia

En un transformador eléctrico, al igual que en todas las máquinas eléctricas, hay pérdidas de potencia. Por tratarse de una máquina estática, no existen pérdidas de

potencia de origen mecánico en un transformador y éstas se reducen a las del hierro del circuito magnético y las del cobre de los bobinados.

Pérdidas en el hierro

La potencia pérdida en el hierro del circuito magnético de un transformador puede ser medida la prueba de vacío.

Se alimenta el transformador al vacío, la potencia absorbida en ese momento corresponde exactamente a las pérdidas en el hierro.

En efecto por ser nula la intensidad de corriente en el bobinado secundario no aparecen en el pérdidas de potencia.

Por consiguiente se puede afirmar que el total de la potencia absorbida por un transformador funcionando al vacío bajo a voltaje nominal, representa el valor de la potencia pérdida en el hierro del circuito magnético.

Dichas pérdidas son causadas por el fenómeno de histéresis y por las corrientes de Foucault, las cuales dependen del voltaje de la red, de la frecuencia y de la inductancia a que está sometido el circuito magnético.

La potencia pérdida en el núcleo permanece constante, ya sea en vacío o con carga.

Pérdidas en el cobre (Pc):

Es la suma de las potencias pérdidas en los bobinados de un transformador, funcionando bajo carga nominal.

El valor de esta potencia depende de la intensidad de corriente tanto en el bobinado primario como en el secundario,

la cual varía mucho desde el funcionamiento en vacío a plena carga.

La variación del valor de la potencia pérdida en el cobre es proporcional al cuadrado de la intensidades de corriente de carga y a la resistencia de los bobinados.

$$P_{cu} = I_1^2 \times r_1 + I_2^2 \times r_2$$

Donde:

P_{cu} = Pérdidas en los bobinados del transformador.

I_1 = Intensidad en el bobinado primario.

I_2 = Intensidad en el bobinado secundario.

r_1 = Resistencia del bobinado primario.

r_2 = Resistencia del bobinado secundario.

Otra forma de determinar las pérdidas en los bobinados de un transformador es mediante la prueba de cortocircuito.

Para lograr ésto se alimenta el bobinado primario bajo un voltaje de valor tal, que estando cerrado en cortocircuito el bobinado secundario, sean recorridos ambos bobinados por intensidades de corriente iguales a sus valores nominales respectivos.

La potencia absorbida por el transformador en estas condiciones corresponde exactamente a las pérdidas totales en el cobre del conjunto de los dos bobinados.

En efecto las pérdidas de potencia "totales" es el resultado de la pérdidas en el núcleo (P_h) más las pérdidas en el cobre de los bobinados (P_{cu}).

$$\text{Pérdidas totales} = P_h + P_{cu}$$

	Características del cable eléctrico flexible		
	1	2	3
Sección transversal del conductor (mm ²)	Máxima resistencia eléctrica (a 20°C) del conductor	Diámetro de los alambres elementales (mm)	Máximo diámetro del conductor (mm)
	Cobre rojo (ohmios/km)	Cobre estañado (ohmios/km)	
6	3,08	3,11	0,30 + 0,90
10	1,83	1,84	0,30 + 0,90
16	1,15	1,16	0,30 + 0,90
25	0,727	0,734	0,30 + 0,90
35	0,524	0,529	0,30 + 0,90
50	0,387	0,391	0,30 + 0,90
70	0,268	0,270	0,30 + 0,90
95	0,193	0,195	0,30 + 0,90
120	0,153	0,154	0,30 + 0,90
150	0,124	0,126	0,30 + 0,90
185	0,0991	0,100	0,30 + 0,90
240	0,0754	0,0726	0,30 + 0,90
300	0,0601	0,0607	0,30 + 0,90

Tabla de valores característicos del cable eléctrico flexible [4]

Espe- sor (mm)	Tole- rancia	Aleación % SI	1 Tesla (10 ⁴ Gauss) W/kg	1,5 Tesla 1,5 · 10 ⁴ Gauss W/kg
0,5	0,10	0,5 - 1	2,9	7,40
0,5	0,10	2,5	2,3	5,6
0,35	0,10	2,5	1,7	4
0,35	0,10	4	1,3	3,25
0,35	0,10	4,5	1,2	3
0,35	0,10	4,5	0,9	2,1

Tabla con las características para determinar las pérdidas de potencia [2]

Metal	Cu. Elec. Blando	Al. Duro	Almelec 3/4 dureza	Plomo (alea. Al)	Acero	
Peso espec. (kg/dm ³)	8.89	8.89	7	2.7	11.35	7.8
ρ a 20°C (m/mm ²)	17.5	17.8	28.5	32.5	206	190
Temp. Fusión (°C)	1083	1083	657	657	327	1400
Resis. Ruptura (N/mm ²)	20-25	35-50	12-15	35-40	1.75	40-150
Calor especif. (Cal / °Cg)	0.093	0.093	0.214	0.214	0.030	0.114
Mod. Elasticidad (N/mm ²)	10500	12000	5600	6000	1700	18500
α a 20°C (10 ⁻⁶ /°C)	17	17	23	23	29	11.5
Coef Δ pon t (10 ⁻³ /°C)	4	4	4	3.6	4.2	4
Cond. Térmica (W/°Ccm)	3.85	3.85	2.17	1.84	0.35	0.46

Tabla con coeficiente alfa de temperatura. [4]

• Conclusiones

Analizando las pérdidas de un transformador real en este ensayo, podemos ver que estas pérdidas siempre estarán presentes ya sea en gran cantidad o en poca pero ahí estarán. Sin embargo las pérdidas en un transformador se las puede

reducir considerablemente tomando las medidas necesarias.

También se debe tomar en cuenta que para tomar una medida que disminuya las pérdidas en el transformador, debemos analizar muy bien, debemos poner en la balanza lo positivo y lo negativo que se produce al cambiar algo, y ver si nos conviene o no tomar dicha medida.

Siendo ya casi ingenieros estamos muy capacitados para tomar medidas necesarias al momento de fabricar un transformador, pues ya conocemos todas las implicaciones del caso.

• *Bibliografía*

[1]

<http://www.etitudela.com/Electrotecnia/downloads/magnetimo.pdf>

[2][http://www.mcgraw-](http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448141784.pdf)

[hill.es/bcv/guide/capitulo/8448141784.pdf](http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448141784.pdf)

[3]<http://www.etitudela.com/Electrotecnia/principiosdelaelectricidad/tema1.3/contenidos/01d56994aa1070f1e.html>

[4]<http://www.electrosector.com/wp-content/ftp/descargas/perdida.pdf>