

Method for determining total losses in distribution transformers from the percentage of carbon silicon steel sheet

María Gabriela Mago-Ramos ^a; Luis Vallés ^b; Jhon Olaya ^c; Martha Zequera ^d & Jhon Edwin Vera-Vera ^e

^{a,e} Vicerrectoría de Investigación, Universidad ECCI, Bogotá, Colombia. mmagor@ecc.edu.co, jverav@ecc.edu.co

^b Doctorado en Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela. Le.valleds@gmail.com

^c Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Bogotá, Colombia. jjolayaf@unal.edu.co

^d Facultad de Ingeniería, Universidad Pontificia Javeriana de Bogotá, Bogotá, Colombia. mzequera@javeriana.edu.co

Received: July 1st, de 2015. Received in revised form: May 20th, 2016. Accepted: May 25th, 2016

Abstract

Transformers are electrical devices that are responsible for the distribution and management of electrical power. In Latin America the recycling of silicon steel sheet transformer is very common and therefore its construction is very important because we must consider the losses that may occur by eddy currents and magnetic hysteresis especially when the team has operated under load condition. This paper proposes a novel method to determine the total losses in the single-phase distribution transformers Pole, analyzing the percentage of carbon silicon steel sheet and chemical characteristics. This diagnostic checks the iron losses in proportion to the square of the frequency induction and also applying the formula Steinmetz order to perform diagnosis and failure prediction. Although the results have approximation errors are useful for diagnosis and reuse of the silicon steel sheet, since changes in the microstructure (grain size in the nanometer scale) or ratio are significant quality B-H The contribution to the manufacturers and the industry in general is exegetical, because if they are considered the values set the standard for equipment operating under this condition, the service conditions are improved distribution networks and consequently, reliability and / or maintenance in electric utilities.

Keywords: Total losses, distribution transformer, silicon steel sheet.

Método para determinar las pérdidas totales en transformadores de distribución a partir del porcentaje de carbono de la chapa de acero al silicio

Resumen

Los transformadores son dispositivos eléctricos que se encargan de la distribución y manejo de la corriente eléctrica. En América Latina el reciclaje de la chapa de acero al silicio de los transformadores es muy común y por esta razón su construcción es de gran importancia debido hay que considerar las pérdidas que se pueden presentar por corrientes parásitas e histéresis magnética sobre todo cuando el equipo ha operado bajo condición de carga. Este artículo propone un novedoso método para determinar las pérdidas totales en los transformadores de distribución monofásicos de poste, analizando el porcentaje de carbono de la chapa de acero al silicio y sus características químicas. Este diagnóstico verifica las pérdidas en el hierro de forma proporcional al cuadrado de la inducción y frecuencia aplicando también la fórmula de Steinmetz con el fin de realizar diagnóstico y predicción de fallas. Los resultados obtenidos aunque presentan errores de aproximación son de gran utilidad para el diagnóstico y la reutilización de la chapa de acero al silicio, ya que los cambios en la micro estructura (tamaño de grano en escala nanométrica) o relación entre la calidad B-H son significativos, el aporte a los fabricantes y la industria en general es exegetico, porque si son considerados los valores establecidos en la norma para los equipos operando bajo esta condición, se mejoran las condiciones del servicio en las redes de distribución y en consecuencia, la confiabilidad y/o mantenimientos en las empresas del sector eléctrico.

Palabras claves: Pérdidas totales, transformador de distribución, chapa de acero al silicio.

How to cite: Mago-Ramos, M.G., Vallés, L.; Olaya J.; Zequera M., & Vera-Vera, J. Método para determinar las pérdidas totales en transformadores de distribución a partir del porcentaje de carbono de la chapa de acero al silicio DYNA 83 (198) pp. 148-153,

1. Introducción

Este artículo tiene como objetivo fundamental determinar las pérdidas totales en el núcleo de los transformadores de distribución monofásicos de poste debido a las Corrientes de Foucault “que se producen en cualquier material conductor cuando se encuentra sometido a una variación de flujo magnético”. Se conocen también como pérdidas por corrientes parásitas y dependerán del material del que esté constituido el núcleo magnético y debido a la Histéresis Magnética, cuyo fenómeno “se produce cuando la imantación de los materiales ferromagnéticos no solo depende del valor del flujo sino también de los estados magnéticos anteriores, la inducción magnética dependerá del tipo de chapa”. A partir del porcentaje de carbono obtenido de la composición química de la chapa de acero al silicio [1,2].

Hay que considerar las propiedades físicas y magnéticas para evaluar las pérdidas totales que establece la norma [3] para equipos operando bajo carga, de manera que, se comprueben en forma experimental cambios importantes en las pérdidas por Histéresis Magnética y Corrientes de Foucault a partir de la magnetización utilizando aparatos especiales [4]. En los procesos de fabricación debe tomarse en cuenta el tratamiento térmico para garantizar la durabilidad ante condiciones de falla, es por ello que [5, 6] se debe verificar la microestructura, cristalografía y propiedades en el proceso de laminado que es fundamental para este tipo de material. En el mismo orden de ideas, hay que incorporar recocidos y pruebas de tensión donde se evalúe la anisotropía y energía magneto cristalina a partir de la textura obtenida [7,8]. Las modelaciones en las condiciones de diseño [9,10,11] evidencian los efectos del coeficiente de oscilación del material mediante el análisis del impacto estructural, al igual que los cambios en el borde de corte [12]. Lo indicado anteriormente puede articularse para evaluar propiedades físicas y magnéticas en forma experimental. Otro comportamiento correspondiente a la condición de falla versus las pérdidas en el núcleo que ha sido objeto de estudio, es la polarización y frecuencia de magnetización versus la inducción circular teniendo en cuenta el efecto de la piel [13] que en investigaciones futuras permitiría construir una ecuación de difusión electromagnética a través del espesor de la muestra. Es conveniente considerar la dirección de la magnetización a fin de comprender el comportamiento de la chapa de acero al silicio [14, 15], el grado de acero eléctrico, la orientación de grano y las características microestructurales para las pruebas experimentales que estos requieran [16,17], incluso en la actualidad hay investigadores que están valorando las pérdidas en el núcleo con precisión [18] utilizando un método de aproximación para cuatro materiales magnéticos típicos de uso frecuente en electrónica de potencia: con 3% de acero al silicio de grano orientado, 6,5% de chapa de acero de silicio, material amorfo, y materiales nanocristalinos magnetizados con una tensión rectangular simétrica y asimétrica cuyas deducciones experimentales indican, que la componente de corriente continua de la intensidad de campo magnético causa errores en la medición, que para el caso propuesto en este artículo

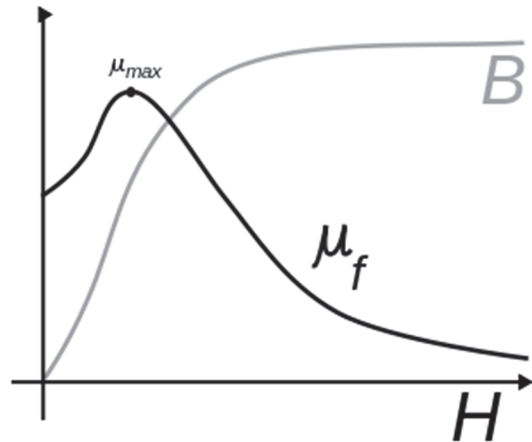


Figura. 1. Efecto de la Saturación Magnética.
Fuente: M. Mago, 2013

corresponde, a la aplicación de un método numérico que también presenta esta condición de error, sin embargo, la importancia radica en que si el material es reutilizado por las empresas que reparan o fabrican estos equipos de acuerdo al nivel de pérdidas totales obtenido, pueden decidir si es factible o no realizar este proceso para los transformadores de distribución. Aunque no se ha considerado en esta investigación es necesario tener en cuenta en investigaciones futuras, la eficiencia energética y el impacto ambiental para las pérdidas producidas en el interior del núcleo, cómo estas afectan el medio ambiente [19,20]. Las empresas fabricantes y los operadores del sistema eléctrico deben trabajar en políticas conjuntas para mejorar esta condición.

Las propiedades físicas del material como Resistencia Eléctrica, Conductibilidad Térmica, Saturación Magnética, Fuerza Coercitiva, Inducción Remanente y Permeabilidad Magnética son condiciones fundamentales para determinar las características de la aleación en estudio y por consiguiente las pérdidas en el núcleo [21]. Dentro de esas propiedades físicas la Saturación Magnética “es un efecto que se observa en algunos materiales magnéticos, y se caracteriza como el estado alcanzado cuando cualquier incremento posterior en un campo de magnetización externo H no provoca un aumento en la magnetización del material. Esto demuestra que el campo magnético total B tiende a estabilizarse”.

Con esta propiedad física, se determina la Densidad de Flujo Magnético B_{max} y por consiguiente, las pérdidas totales.

2. Metodología

Se recolectaron muestras de equipos fallados procedentes de diferentes regiones de Colombia (Antioquia, Pacífico, Cundinamarca, Bogotá, y Caldas) las cuales corresponden a la población del estudio (Tabla 1), a las cuales se les realiza análisis químico para determinar el porcentaje de carbono con el equipo Spectrovac, Marca Baird (Tabla 2). Esta evaluación incluye dos (02) mediciones y el valor promedio verificando los contenidos de Hierro (Fe), Carbono (C), Manganeseo (Mn), Fosforo (P), Azufre (S), Silicio (Si), Cobre (Cu), Niquel (Ni), Cromo (Cr), Vanadio (V),

Molibdeno(Mo), Wolframio o Tusgteno (W), Cobalto (Co), Titanio (Ti), Estaño(Sn), Aluminio (Al), Niobio(Nb), Boro (B), Plomo (Pb), Magnesio (Mg). El porcentaje de carbono obtenido y comparado con el valor promedio es el referente utilizado para determinar las pérdidas totales del núcleo de los transformadores fallados.

Es necesario verificar las características de la aleación utilizada en cuanto a espesor, tolerancia y porcentaje de silicio, a fin de comparar las pérdidas de potencia que establece el fabricante respecto a energía/peso (W/kg) (Tabla 3).

Tabla 1. Población del Estudio: selección definitiva

Departamento de Procedencia del Transformador	Tipo de Falla	Cantidad
Caldas	Térmica	1
	Eléctrico	1
	Descarga Parcial	1
Antioquia	Térmica	1
	Eléctrico	2
	Descarga Parcial	1
	Térmica	1
Pacífico	Eléctrico	1
	Descarga Parcial	1
	Térmica	1
Cundinamarca	Térmica	1
Bogotá	Térmica	1
	Eléctrico	3
	Descarga Parcial	1
TOTAL		16

Fuente: M. Mago, 2011.

Tabla 2. Análisis Químico

Regiones	Fallas	% Carbono
REGION ANTIOQUIA	TERMICA	0,193
	DESCARGA PARCIAL	0,069
	ARCO ELECTRICO	0,010
REGION CALDAS	TERMICA	0,067
	ARCO ELECTRICO	0,040
	ARCO	
	ELECTRICO/TERMICA	0,019
REGION CUNDINAMARCA	DESCARGA PARCIAL	0,014
	TERMICA	0,031
REGION BOGOTA	ARCO	
	ELECTRICO/TERMICA	0,105
	ARCO ELECTRICO	0,093
	DESCARGA PARCIAL	0,101
REGION PACIFICO	TERMICA	0,1735
	TERMICA/ARCO	
	ELECTRICO	0,131
PATRON DE REFERENCIA	ARCO ELECTRICO	0,002
	DESCARGA PARCIAL	0,033
		0,033

Fuente: M. Mago, 2012.

Tabla 3. Características de la aleación.

Espesor	Tolerancia	Aleación % SI	1 Tesla (10 ⁴ Gauss) W/kg
0,5	0,10	0,5 – 1	2,90
0,5	0,10	2,5	2,3
0,35	0,10	2,5	1,7
0,35	0,10	4	1,3
0,35	0,10	4,5	1,2
0,35	0,10	4,5	0,9

Fuente: M. Mago, 2012

Finalmente, se aplican métodos numéricos con el programa Matlab®, construyendo una Recta de Regresión $y=Ax+B$ que mejor se ajusta en el sentido de los mínimos cuadrados a los N datos $(X_i, Y_i), \dots, (X_n, Y_n)$, obteniendo el valor de Saturación Magnética [22].

A continuación, se aplica un ejemplo de cálculo para la muestra procedente del Departamento de Antioquia:

Donde:

X= esta serie corresponde al porcentaje de carbono de la aleación

Y= esta serie corresponde a la Saturación Magnética

- Tipo de Falla: Térmica. Causa: Sobrecarga.

>> X=[0 0.1 0.193 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2];

>> Y=[2000 1900 1850 1800 1700 1600 1450 1300 1100 900 700 500 300 0];

>> lsline(X,Y)

ans = -1.6463e+003

>> sum(X) ans = 7.9910

>> sum(Y) ans = 17100

>> G=(-7.9910*-1.6463e+003+17100)/(14) = 2.1611e+003

>> y=(-1.6463e+003*(0.193))+2.1611e+003 = 1.8434e+003

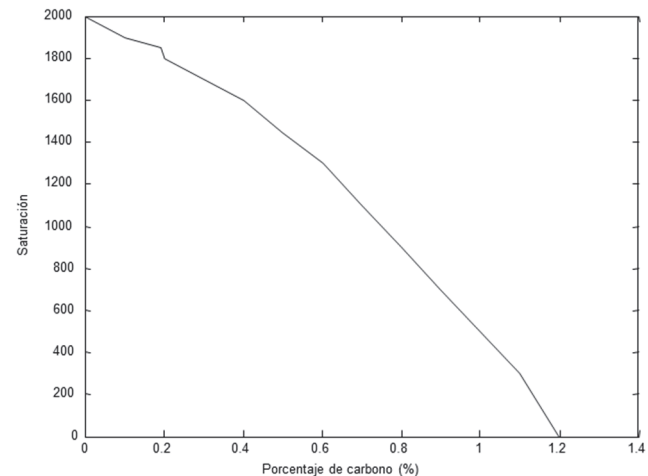


Figura 2. Cálculo de la saturación magnética. Región Antioquia. Falla Térmica.

Fuente: M. Mago, 2013

El valor obtenido de 1.8434e+003 de Saturación Magnética, corresponde a la densidad de flujo máximo, el cual será utilizado para el determinar las pérdidas totales tomando en consideración el peso del equipo, que para un transformador de capacidad 5 kVA es de 75 kg.

Cálculo de pérdidas totales: pérdidas por corrientes de Foucault y pérdidas por Histéresis Magnética.

En un transformador se producen pérdidas por corrientes de Foucault (P_f), pérdidas por histéresis (P_h) y en el cobre del bobinado (P_{cu})

Pérdidas por corrientes de Foucault: se obtienen a partir de la siguiente expresión de la eq (1):

$$P_f = \frac{2,2 f^2 \beta \max^2 \Delta^2}{10^{11}} \quad (1)$$

Donde:

P_f = pérdidas por corriente de Foucault (W/kg).

f = frecuencia en Hz.

B_{\max} = inducción máxima en Gauss.

Δ = espesor de la chapa en mm.

Pérdidas por Histéresis Magnética: se obtiene aplicando la fórmula de Steinmetz indicada a continuación en la eq (2):

$$P_h = K_F f \cdot \beta \max^n \quad (2)$$

Donde:

P_h = pérdidas por Histéresis Magnética (W/kg).

K_h = coeficiente de cada material.

f = frecuencia en Hz.

B_{\max} = inducción máxima en Tesla.

$n = 2$ para $\beta > 1$ Tesla y $1,6$ para $\beta < 1$ Tesla

Pérdidas Totales: las pérdidas de potencia en el hierro (P_{FE}) o en el núcleo magnético son la suma correspondiente a las pérdidas por Foucault (P_f) e histéresis (P_h) tal y como, se indica a continuación en la eq (3):

$$Pérdidas Totales en el Núcleo (Pt) = P_t = (P_f) + (P_h) \quad (3)$$

La ecuación final utilizada corresponde a la siguiente expresión, eq (4) [23]:

$$B_{\max} = \sqrt{\left(\frac{10^{11} P_t}{10^{11} K_h f + 2,2 f^2 \Delta^2} \right)} \quad (4)$$

3. Resultados

En las Tablas 4, 5, 6 y 7 se muestran los resultados obtenidos los cuales han sido comparados de forma adicional con las pruebas magnéticas:

4. Discusión de resultados

En las Tablas 4, y 5 se muestran los cálculos de pérdidas por *Corrientes de Foucault*, e *Histéresis Magnética* obtenidos de acuerdo al método propuesto, indicando en las mismas regiones de procedencia, tipos de fallas, valores obtenidos

Tabla 4. Pérdidas por Corrientes de Foucault.

Región Antioquia	Tipo de falla	% de Carbono	Pruebas magnéticas
Muestra 1	Térmica	1,3608019	1,00939608
Muestra 2	Descarga parcial	1,3986951	1,00939608
Muestra 3	Arco eléctrico	1,4163174	1,00939608
Región Caldas			
Muestra 5	Térmica	1,39874171	1,00939608
Muestra 6	Arco eléctrico	1,4071184	1,01137626
Muestra 7	Arco eléctrico	1,41359885	1,00939608
Muestra 8	Descarga parcial	1,41500452	1,01335838
Región Pacífico			
Muestra 9	Térmica	1,88154258	1,44404568
Muestra 10	Arco eléctrico	1,418616	1,01335838
Muestra 11	Descarga parcial	1,408848	1,01335838
Región Cundinamarca			
Muestra 12	Térmica	1,653187	1,21267626
Región Bogotá			
Muestra 13	Arc eléctrico/Térmica	2,7915874	2,24450046
Muestra 14	Arc eléctrico	1,3913426	1,01137626
Muestra 16	Descarga parcial	1,3830362	1,01137626
Muestra 17	Térmica	1,3658764	1,01137626
Patrón			
Muestra 18		2,82052799	2,24155008

Fuente: M. Mago, 2012

Tabla 5. Pérdidas por Histéresis Magnética.

Región Antioquia	Tipo de falla	% de Carbono	Pruebas magnéticas
Muestra 1	Térmica	0,16831935	0,13554054
Muestra 2	Descarga parcial	0,17299878	0,13554054
Muestra 3	Arco eléctrico	0,17518707	0,13554054
Región Caldas			
Muestra 5	Térmica	0,17300454	0,13554054
Muestra 6	Arco eléctrico	0,17404062	0,1355676
Muestra 7	Arco eléctrico	0,17484216	0,13554054
Muestra 8	Descarga parcial	0,17501602	0,13562171
Región Pacífico			
Muestra 9	Térmica	0,23272017	0,19504854
Muestra 10	Arco eléctrico	0,17546266	0,13559465
Muestra 11	Descarga parcial	0,17425457	0,13562171
Región Cundinamarca			
Muestra 12	Térmica	0,20447577	0,16388504
Región Bogotá			
Muestra 13	Arc eléctrico/Térmica	0,34527983	0,30460110
Muestra 14	Arc eléctrico	0,17208937	0,1355676
Muestra 16	Descarga parcial	0,17106199	0,13554054
Muestra 17	Térmica	0,16893957	0,13556760
Patrón			
Muestra 18		0,34885937	0,30456054

Fuente: M. Mago , 2012

Tabla 6.
Pérdidas Totales

Región	Tipo de falla	% de Carbono	Pruebas magnéticas
Región Antioquia			
Muestra 1	Térmica	114,688596	85,8702465
Muestra 2	Descarga parcial	117,877042	85,8702465
Muestra 3	Arco eléctrico	119,368088	85,8702465
Región Caldas			
Muestra 5	Térmica	117,880969	85,8702465
Muestra 6	Arco eléctrico	118,586927	86,020789
Muestra 7	Arco eléctrico	119,133076	85,8702465
Muestra 8	Descarga parcial	119,25154	86,173507
Región Pacífico			
Muestra 9	Térmica	158,569707	122,932067
Muestra 10	Arco eléctrico	119,555869	86,1714773
Muestra 11	Descarga parcial	118,732706	86,1735068
Región Cundinamarca			
Muestra 12	Térmica	139,324676	103,242098
Región Bogotá			
Muestra 13	Arc eléctrico/Térmica	235,265044	191,182617
Muestra 14	Arc eléctrico	117,257369	86,020789
Muestra 16	Descarga parcial	116,557365	86,018759
Muestra 17	Térmica	115,111196	86,020789
Patrón			
Muestra 18		131,828066	98,5467465

Fuente: M. Mago, 2012

Tabla 7.
Pérdidas versus tamaño del cristal (grano) de acuerdo al porcentaje de Carbono

Región	Pérdidas totales	Tamaño del Cristal	Error aproximado
Antioquia	1,59157447	5,05	1,421048634
Caldas	1,58115902	0	1,411749125
Pacífico	1,59407866	41,06	1,423284518
Bogotá	1,563432	54,36	1,395921429
Patrón	3,16938739	13,6	2,829810170

Fuente: M. Mago, 2012

de acuerdo al porcentaje de carbono y las pruebas magnéticas. De estos resultados los más aproximados a los establecidos por el fabricante Acesita (Brasil) hoy APERAM, corresponden a las muestras 1, 5 y 17 procedentes de las Regiones Antioquia, Caldas y Bogotá debido a fallas térmicas, y la muestra 11 procedente de la Región Pacífico debido a falla por descarga parcial. En contraparte a los resultados obtenidos, al aplicar pruebas magnéticas se aprecia un margen de error entre cinco (5) y ocho (8) por ciento. Estos datos sirven de referencia a los expertos que reparan o fabrican núcleos para estos equipos.

En la Tabla 6 se hace el cálculo de las pérdidas totales con las mismas condiciones anteriores, sin embargo, se incluye el valor del peso del equipo para los resultados y se compara igualmente con la norma que establece el fabricante para las pérdidas bajo condición de carga. El margen de error obtenido en los cálculos para el porcentaje de carbono oscila entre veintisiete con cuarenta y dos por ciento (27,42%) y sesenta y uno con cuatro por ciento (61,4%), mientras que al

realizar pruebas magnéticas es de cinco con cuarenta y uno por ciento (5,41%) a doce con cuarenta y dos por ciento (12,42%). A pesar de estos errores de aproximación los resultados siguen siendo de suma importancia para las empresas responsables de los procesos de reparación, ya que pueden verificar si la chapa de acero al silicio está en condiciones de ser o no reutilizada.

En la Tabla 7 se muestran resultados obtenidos de forma específica para la falla debido al arco eléctrico, regiones de procedencia y pérdidas. Estos valores fueron comparados con el tamaño de cristal (grano) en escala nanométrica y el error de aproximación. Los valores obtenidos son representativos en cuanto al tamaño de grano para todas las muestras, ya que las mismas están fuera de norma lo que indica posibles cambios en la estructura física del material no importando la región de procedencia. Al utilizar este método en la determinación de las pérdidas totales deben considerarse estos errores en los cálculos prácticos.

5. Conclusiones

Se ha generado un nuevo conocimiento que utiliza un método para determinar las pérdidas totales del núcleo de los transformadores de distribución monofásicos de poste a través de las propiedades físicas de la chapa de acero al silicio.

Los métodos numéricos utilizados originan errores en la medición, sin embargo, por razones de inmediatez para las empresas que reparan o fabrican estos equipos este método resulta bastante útil, siempre y cuando, “*se considere dicho error*”.

Se evitan gastos innecesarios de reparaciones o mantenimientos de estos equipos si previamente, se determinan las pérdidas totales antes de reutilizar la chapa de acero al silicio, sobre todo si al aplicar este método, se comprueba que la misma no posee condiciones apropiadas establecidas en la norma, con lo cual, se aumenta la confiabilidad en las redes de distribución de energía eléctrica.

6. Recomendaciones

Establecer normas técnicas para que este método pueda ser aplicado por las empresas encargadas de reparar o fabricar transformadores de distribución, de acuerdo a lo establecido por los entes gubernamentales y regulatorios correspondientes.

Agradecimientos

Al Laboratorio de Tratamientos Térmicos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá y al de Laboratorio de Magnetismo de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, de manera especial a la empresa colombiana FYR Ingenieros C.A y al Prof. Msc. Héctor Mosquera de la Universidad Nacional de Colombia.

Bibliografía

- [1] E. STAFF DEL M.I.T. Circuitos Magnéticos y Transformadores. Editorial Reverte. Argentina. 1981. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/99522748/Circuitos-Magneticos-y-Transformadores-MIT-Staff-Edit-Reverte-En-Espanol>.

- [2] Oda, Y., Toda, H., Shiga, N., Kasai, S. and Hiratani, T., Effect of Si content on iron loss of electrical steel sheet under compressive stress. *IEEE Transactions on Fundamentals and Materials*. 134(3), pp. 148-153, 2014. DOI: 10.1109/TMAG.2013.2290321.
- [3] Norma RA7-60. Valores de pérdidas equipos bajo condición de carga. [En línea]. Disponible en: <http://www.epm.com.co/site/Portals/0/Users/001/01/1/RA7-060.pdf>. Consultado: 20-06-12 hora: 10:30 am.
- [4] Miyamoto, M., Matsuo, T. and Nakamura, T., Measurement of vector hysteretic property of silicon steel sheets at liquid nitrogen temperature. *Przeglad Elektrotechniczny*. [Online]. 87(9B), pp. 111-114, 2011. Available at: https://www.researchgate.net/publication/265531441_Measurement_of_Vector_Hysteretic_Property_of_Silicon_Steel_Sheets_at_Liquid_Nitrogen_Temperature
- [5] Zhao, J.-W., Zhang, W.-K. and Miao, X., Effect of percentage reduction in two-stage cold rolling on microstructure, texture and magnetic properties of high grade non-oriented silicon steel sheets. *Kang Tieh/Iron and Steel*. [Online]. 47(11), pp. 69-72, 2012. Available at: https://www.researchgate.net/publication/287026490_Effect_of_percentage_reduction_in_two-stage_cold_rolling_on_microstructure_texture_and_magnetic_properties_of_high_grade_non-oriented_silicon_steel_sheets
- [6] Pampa, G., Richard, R., Chromik, A.M., Knight, S.G. and Wakade, C., Effect of metallurgical factors on the bulk magnetic properties of non-oriented electrical steels. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 356, pp. 42-51, 2014. DOI: 10.1016/j.jmmm.2013.12.052.
- [7] Ali, S., Mohammad, R.T., Hossein, E. and Jerzy, A.S., Effect of deformation route and intermediate annealing on magnetic anisotropy and magnetic properties of a 1 wt% Si non-oriented electrical steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 385, pp. 331-338, 2015. DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.03.026.
- [8] Pluta, W.A., Loss components in electrical steel with Goss texture. *International Symposium on Electrodynamics and Mechatronic Systems, SELM 2013 – Proceedings*, Article number 6562993, pp. 87-88. Zawiercie; Poland. 2013. DOI: 10.1109/SELM.2013.6562993.
- [9] Magdaleno-Adamea, S., Olivares-Galvanb, J.C., Kulkarnic, S.V. and Escarela-Perezb, R., Analysis of slots in horizontal plates of T-beams in shell-form power transformers. *Electric Power Systems Research*, 101, pp. 88-95, 2013. DOI: 10.1016/j.epsr.2013.03.007.
- [10] Sha, Y.H., Sun, C., Zhang, F., Patel, D., Chen, X., Kalidindi, S.R., Zuo, L., Strong cube recrystallization texture in silicon steel by twin-roll casting process. *Acta Materialia*, 76, pp. 106-117, 2014. DOI: 10.1016/j.actamat.2014.05.020.
- [11] Paltanea, V.M., Paltanea, G., Gavrilă, H. and Peter, I., The influence of punching and laser cutting technologies on the magnetic properties of non-oriented silicon iron steels. *International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering, ISFEE*. University Politehnica of Bucharest, Bucharest; Romania. 2014. DOI: 10.1109/ISFEE.2014.7050611.
- [12] Pluta, W.A., Loss components in electrical steel with Goss texture. *International Symposium on Electrodynamics and Mechatronic Systems, SELM 2013 – Proceedings*, [Online]. Article number 6562993, pp. 87-88. Zawiercie; Poland. 2013. Available at: <http://toc.proceedings.com/18784webtoc.pdf>
- [13] Appino, C., De La Barrière, O., Beatrice, C., Fiorillo, F. and Ragusa, C., Rotational magnetic losses in nonoriented Fe-Si and Fe-Co laminations up to the kilohertz range. *IEEE Transactions on Magnetics*. 50(11), Article number 6971426. Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, Department of Electromagnetics, Torino, Italy. 2014. DOI: 10.1109/TMAG.2014.2325968.
- [14] Pluta, W., Directional properties of loss components in electrical steel sheets. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 44(3-4), pp. 379-385, 2014. DOI: 10.3233/JAE-141800.
- [15] Pluta, W.A., Influence of anisotropy on specific loss components in grain oriented electrical steel. *Solid State Phenomena*. 214, pp. 138-142. *International Symposium on Electrodynamics and Mechatronic Systems*, 2014. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.214.138.
- [16] Pluta, W.A., Some properties of factors of specific total loss components in electrical steel. *IEEE Transactions on Magnetics Electrical*, 46(2), pp. 322-325, 2010. DOI: 10.1109/TMAG.2009.2033559.
- [17] Fűzer, J., Birćáková, Z., Zelenáková, A., Hrubovčák, P., Kollár, P., Predmerský, M. and Huňady, J., Investigation of total losses of non-oriented electrical steels. *IEEE Transactions on Magnetics Electrical*, [Online]. 118(5), pp. 1018-1019, 2010. Available at: <http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/PDF/118/a118z5p124.pdf>.
- [18] Hatakeyama, T. and Onda, K., Core, loss estimation of various materials magnetized with the symmetrical/asymmetrical rectangular voltage. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(12), pp. 6628-6635, 2014. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2306755.
- [19] Pavlos, S.G., Environmental cost of distribution transformer losses. *Applied Energy*, 88, pp. 3146-3155, 2011. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.12.021.
- [20] Trianni, A., Cagno, E. and De Donatis, A., A framework to characterize energy efficiency measures. *Applied Energy*, 118, pp. 207-220, 2014. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.12.042.
- [21] Lajtin, Y., *Metalografía y tratamiento térmico de los metales*. 3^{ra} Ed. Editorial MIR. Moscú. URSS. [En línea]. 1983. Disponible en: <http://www.casadellibro.com/libro-metalografia-y-tratamiento-termico-de-los-metales-3-ed/2910009902282/968544>
- [22] Mathews, J. y Fink, K., *Métodos numéricos con Matlab*. Editorial Prentice Hall. 3^{ra} Ed. Madrid, España. 2005.
- [23] Mago, M., Sistema estocástico unificado para la predicción confiable de fallas por condiciones ambientales en transformadores de distribución. Tesis Doctoral, Área de Estudios de Posgrado, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, [En línea]. 2014. Disponible en: www.riuc.bc.uc.edu.ve/bitstream/123456789/1930/1/mmago.pdf.
- [24] Forero, A., Laboratorio de Metales. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 1999.
- [25] Reed-Hill, R., *Principios de metalurgia física*. Editorial C.E.C.S.A. 6^{ta} Ed., México, 1976.
- [26] Shackelford, J., *Ciencia de materiales para ingenieros*. Ed. Prentice Hall. 4^{ta} Ed., México, 1998.
- [27] Smith, W., *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales*. Ed. Mc Graw Hill. 4^{ta} Ed. España.2006.

M.G. Mago-Ramos, is an associate professor of the Postgraduate in the Universidad ECCI, Bogotá, Colombia. She received the MSc. degree in Industrial Engineering 1994 and Electrical Engineering 2011. He received the Dr. degree in Engineering in 2014 from the Universidad de Carabobo in Venezuela. His research interests include: simulation, modeling and forecasting in energy markets; nonlinear time-series analysis and forecasting using statistical and computational intelligence techniques; and optimization using metaheuristics.
ORCID: 0000-0001-7250-111X

L. Vallés, is a titular professor of the University of Carabobo, Venezuela. Dr. of Science from the University of Massachusetts. National Chiao Tung University Postdoctoral, Hsinchu, Taiwan. Today is dedicated to projects and consulting in the industrial sector.
ORCID: 0000-0002-3456-4846

J.J. Olaya, is an associate professor at the Departamento de Ingeniería y Mecatrónica in the Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. He conducts research in the general area of development and applications of thin films deposited by plasma assisted techniques, corrosion and wear. He received his PhD in 2005 from the Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico.
ORCID: 0000-0002-6942-4907,

M. Zequera, is a titular professor at the Departamento de Ingeniería in the Universidad Pontificia Javeriana de Bogotá, Bogotá, Colombia. He conducts research in the general area of Bioengineering. Is Dr. in Bioengineering from the UK University in United Kingdom.
ORCID: 0000-0001-7315-5909

J.E. Vera-Vera, is an associate professor at the Departamento de Ingeniería y Mecatrónica in the Universidad ECCI, Bogotá, Colombia. He conducts research in the general area of power electronics and alternative energy. He received his Msc in 2013 from the Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
ORCID: 0000-0002-0237-1257