

Nota técnica:

Estudio de la chapa de acero al silicio para el núcleo del transformador monofásico

María G. Mago^{*a}, Lin Hurtado^b, Yamile Raffoul^b, Irvin Leal^a

^aFacultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

^bFacultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

Resumen.-

El estudio sobre la factibilidad técnica para elaborar chapas de aceros al silicio, materia prima fundamental para la fabricación del núcleo del transformador monofásico se justifica, porque en Venezuela, no se fabrica la misma; ocasionando demoras en la entrega del pedido, retrasando así, la producción y fabricación de los transformadores monofásicos; elevando los costos operativos generados a causa de la importación de este material. Se desarrolló una metodología basada en las siguientes etapas: identificación de los elementos químicos que conforman la chapa, determinación de la microestructura y orientación de los granos, evaluación de las condiciones que describen el comportamiento eléctrico y magnético ante la presencia de tensiones y corrientes inducidas en el material con apoyo de tablas y gráficos para la fabricación de la chapa de acero al silicio en Venezuela. El trabajo se apoyó en ensayos experimentales. Para la obtención de los resultados confiables fue importante la búsqueda, revisión y apoyo de normas, códigos y material bibliográfico que permitieron tener una visión más clara de los fenómenos involucrados en el comportamiento de la chapa y del proceso de producción de la misma. Además, se logró constatar la situación actual en Venezuela sobre la producción de aceros eléctricos. Se concluyó que el proyecto es rentable y en función a ello, se recomendó la puesta en marcha de dicho proyecto a través de la figura de un consorcio.

Palabras clave: Aceros al Silicio, transformador monofásico, núcleo, microestructura

Study of the silicon sheet steel for the core of the single-phase transformer

Abstract.-

The study on the technical feasibility to develop the silicon steel plates, key raw material for the manufacture of single processor core is justified, because in Venezuela, not manufactured it, causing delays in delivery of orders, thereby slowing down, production and manufacture of transformers monophasic; raising operating costs generated as a result of the importation of such material. It developed a methodology based on the following steps: identifying the chemical elements that make up the plate, determining the microstructure and orientation of the grains, assessment of conditions that describe the electric and magnetic behavior in the presence of voltages and currents induced in with material support of tables and graphs for the manufacture of sheet steel to silicon in Venezuela. The work was supported in experimental trials. To obtain reliable results it was important the search, review and support of standards, codes and library materials that have allowed a clearer picture of the phenomena involved in the conduct of the plate and production process of the same. In addition, it was possible to observe the current situation in Venezuela on the production of electrical steels. It was concluded that the project is profitable and function, it is recommended the launching of this project through the figure of a consortium.

Keywords: Silicon Steel, Single-Phase Transformer, Nucleus, Microstructure

1. Introducción

Los requisitos que la industria moderna impone hacia el bienestar de la sociedad y al aprovechamiento de los recursos que están a la mano, obligan a realizar un constante esfuerzo en cuatro direcciones: empleo de nuevos materiales, rediseño de los útiles, modificación

de los procesos y empleo de nuevas tecnologías. Es importante y determinante en la economía de Venezuela, el desarrollo y estudio de nuevas tecnologías que abran paso hacia aprovechamiento óptimo de los recursos que posee esta gran nación y generar así los siguientes beneficios:

- Desde el punto de vista laboral, empleos sólidos y estables.
- En lo social, mejoramiento de la calidad de vida y

*Autor para correspondencia

Correos-e: mmago@uc.edu.ve (María G. Mago),

lhurtad@uc.edu.ve (Lin Hurtado)

servicios.

- En lo económico, disminuir los costos operacionales.

Esta investigación contribuirá de manera categórica a iniciar los trámites requeridos para establecer en el país una planta que produzca, controle los estándares de calidad y distribuya tanto a nivel nacional como internacional este tipo de acero eléctrico, con la visión de convertir a Venezuela en un país líder en la producción de aceros especiales.

Además, será la que abrirá paso a una nueva área de especialización donde, ingenieros de las escuelas mecánica, eléctrica e industrial, se apoyarán a fin de comprender los fenómenos eléctricos, magnéticos y mecánicos que definen el comportamiento de un acero al silicio, nunca fabricado en Venezuela y cuyo aporte abrirá la brecha a muchos trabajos de investigación, para explorar y concluir sobre la posibilidad de llevar a cabo la instalación de una planta productora de acero al silicio conocido comúnmente como acero eléctrico (chapa magnética).

En el presente trabajo se establece como objetivo determinar la factibilidad técnica del proceso de fabricación de la chapa de acero al silicio para el núcleo del transformador monofásico, y con esta información concluir sobre la puesta en marcha de este proyecto a través de la figura de un consorcio formado por las empresas productoras de transformadores a nivel nacional.

2. Aceros al Silicio

Estos aceros se emplean generalmente en forma de chapa o fleje para la fabricación de núcleos o piezas de máquinas eléctricas y transformadores, que están sometidos a la acción de campos magnéticos que cambian rápidamente de valor. En la actualidad, el material más empleado es el acero al Silicio de bajo contenido de carbono y con 2 a 4,5 % de silicio, también se emplea en algunos casos, aunque muy limitados, otros materiales como el hierro dulce de calidad corriente, el hierro Armco, y la fundición del acero moldeado.[1]

2.1. Propiedades de las Chapas Magnéticas

Las chapas magnéticas se caracterizan por uno o varios de los siguientes atributos:

- a) Pueden imanarse mucho más fácilmente que los demás materiales. Esta característica viene indicada por una gran permeabilidad relativa μ/μ_0 .

- b) Tienen una inducción magnética intrínseca máxima β_{maxima} muy elevada.
- c) Se imanar con una facilidad muy diferente según sea el valor del campo magnético. Este atributo lleva a una relación no lineal entre los módulos B de la inducción magnética y H del campo magnético.
- d) Un aumento del campo magnético les origina una variación de flujo diferente de la variación que originaría una disminución igual de campo magnético. Este atributo indica que las relaciones que expresan la inducción magnética y la permeabilidad μ como funciones del campo magnético, no son lineales ni uniformes.
- e) Conservan la imanación cuando se suprime el campo magnético.
- f) Tienden a oponerse a la inversión del sentido de la imanación una vez imanados.[1]

Otra característica importante que define la calidad magnética es la que vincula los valores de inducción con los valores de campo, (característica B-H), observándose que para las aplicaciones en corriente alterna los valores de inducción son máximos, mientras que los de corriente (causa de H) son eficaces. El aumento de excitación da lugar a un aumento del campo inducido, hasta llegar a un límite en que, para un aumento sensible de este último, haría falta un aumento exagerado de excitación y, por lo tanto, un consumo de energía anormal. Este fenómeno, denominado *saturación del material*, señala un límite superior en el empleo de los materiales magnéticos de distinta calidad.

Las distintas calidades magnéticas de los materiales se consiguen con diferentes contenidos de silicio, que puede alcanzar hasta el 4,5 %. Si bien, un aumento del contenido de silicio da lugar a pérdidas por unidad de peso menores, la saturación se presenta para valores de inducción más bajos, el material se vuelve más frágil y se tiene una mayor abrasión sobre los troqueles que se utilizan para la fabricación. Las condiciones de cizallabilidad empeoran a medida que las pérdidas disminuyen, siendo el objetivo de los fabricantes de materiales magnéticos mejorarla para permitir realizar las operaciones de ranurado con una duración aceptable de las matrices.[2]

Para la obtención de chapas magnéticas de alta eficiencia es necesario controlar tres variables en el proceso de producción que son:

a) Influencia de las impurezas

La composición química que posee el acero es determinante para poder predecir el comportamiento magnético del material en estudio. Sus propiedades mecánicas y magnéticas vienen dadas por su composición química y por la microestructura obtenida tras su proceso de fabricación. El efecto que tiene el carbono en pequeñas proporciones, aún inferiores al 0,01 % varía según se encuentre el material en solución sólida, en forma de cementita globular, perlita o formando martensita. El azufre y manganeso tiene efectos en menor magnitud que el carbono. La presencia de fósforo en cantidades superiores a 0,02 % aumenta [3] las pérdidas por histéresis porque disminuye su permeabilidad. Todos los elementos endurecedores como el cromo, molibdeno, etc. son elementos perjudiciales aun en pequeñas cantidades. La presencia de gases como el hidrógeno, oxígeno y nitrógeno no es muy perjudicial cuando están en solución pero resulta muy perjudicial si se encuentra en el acero.

b) Influencia del tamaño de grano

Hoy por hoy existen muchas hipótesis sobre el efecto del tamaño de grano sobre las propiedades magnéticas. Todas las opiniones de los expertos concluyen con que es conveniente que el grano del acero magnético sea de gran tamaño ya que en la medida que aumenta el tamaño de grano disminuye las pérdidas por histéresis pero a su vez aumentan las pérdidas por corrientes de Foucault esto implica que debe existir un control en el tamaño de grano para que se maneje un equilibrio entre estos dos fenómenos [4].

c) Influencia de la orientación de los cristales Es más difícil magnetizar los cristales de los aceros en unas direcciones que otras, esto es, cuando los pequeños cristales elementales que componen el acero están orientados de forma que las aristas tienen la dirección del flujo, para su magnetización, es necesaria mucha menos fuerza magnetizante que en el caso ordinario en que todos ellos están desordenadamente orientados. Además, se ha comprobado que los cristales cuyas caras forman 45° con la dirección del flujo, son los que oponen más resistencia al paso del mismo. La permeabilidad de una chapa con grano orientado es mayor que en las chapas con el grano sin orientar y las pérdidas menores, es por ello que para trans-

formadores de potencia se usan aceros eléctricos de granos orientados en vez de granos no orientados [5].

3. Procedimiento experimental

Esta investigación trata de una chapa de acero al silicio cuya denominación y característica es desconocida y que forma el núcleo de los transformadores monofásicos. A esta chapa se le realizará el análisis químico para determinar los elementos que la componen por medio de la técnica de absorción atómica y luego se le determinará la microestructura y orientación del grano de la chapa. Básicamente, la muestra en estudio es del tipo no probabilística, debido a que la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de las causas relacionadas con las características de la investigación o de quien hace la muestra (ver Sampieri, año 2004 pág. 305). Luego se evalúan las condiciones que describen el comportamiento eléctrico y magnético ante la presencia de tensiones y corrientes inducidas en el material, se estudia la factibilidad técnica y económica para la fabricación de la chapa de acero al silicio en Venezuela. Finalmente, se concluye con un modelo detallado para la puesta en marcha de una planta industrial encargada de producir esta chapa de acero al silicio para núcleos de transformador monofásico de potencia.

4. Resultados y discusión

A través del método de análisis «Espectrofotometría de Absorción Atómica» realizado a una muestra de chapa magnética utilizada en la construcción del núcleo para transformadores, se identificó de una manera cuantitativa la composición química de los elementos presentes (Tabla 1), debido a que definen y describen el comportamiento magnético del material en estudio

Tabla 1: Composición química de la chapa magnética de silicio

% C	% Mn	% P	% S	% Si
0,08	0,012	0,015	0,002	2,90

La muestra del acero al silicio fué preparada metalográficamente y atacada con Nital al 3 % (3 % de ácido nítrico diluido en 97 % de alcohol etílico) donde, en la cara transversal (Figura 1) la microestructura del material es observada a bajo aumento y se evidencia la pre-

sencia de granos de ferrita e inclusiones/precipitados en la matriz.

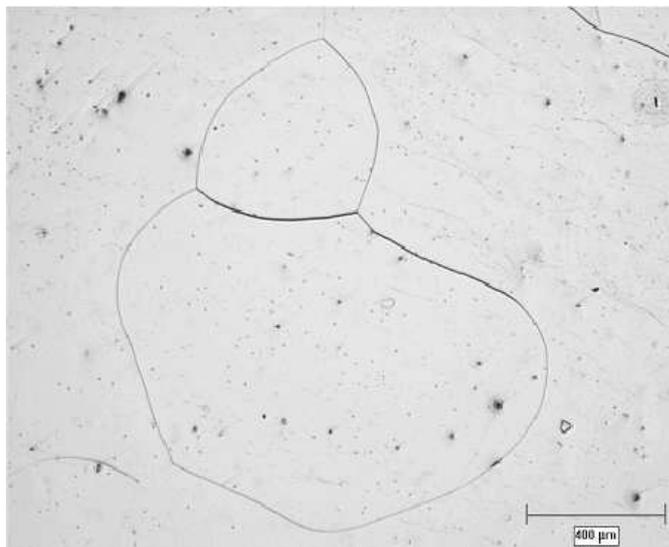


Figura 1: Disposición, forma y tamaño de los granos obtenidos de la muestra de acero al silicio (cara transversal)

En la cara longitudinal (Figura 2) al igual que en el corte transversal se observan granos de gran tamaño y mucha porosidad (se estima que ésta es consecuencia del ataque químico realizado al material).

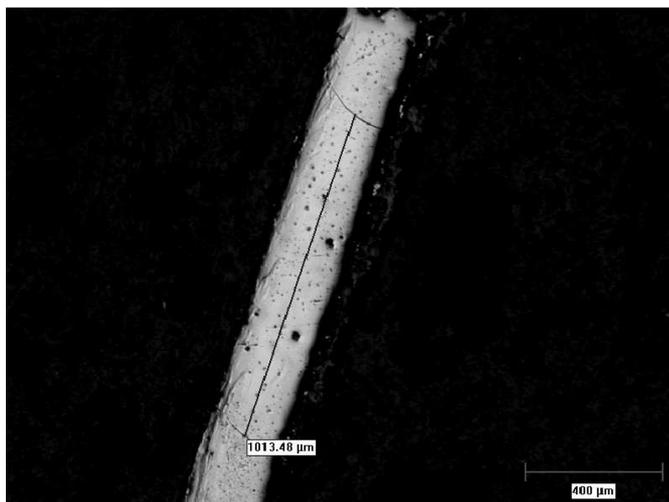


Figura 2: Disposición, forma y tamaño de los granos obtenidos de la muestra de acero al silicio (cara longitudinal)

El Silicio por estar en porcentaje superior a 2,5 % hace en el acero estudiado sea ferrítico. Esta circunstancia es favorable ya que estos aceros son de grano grosero con tendencia a que el grano aumente en los sucesivos calentamientos a que se somete el material,

lo cual es una ventaja ya que con ello se reducen las pérdidas por histéresis.[6]. A continuación se muestra en la Tabla 2 las propiedades características de la chapa:

5. Conclusiones

Con la realización de esta investigación, se concluyó lo siguiente:

1. A través del ensayo de espectrofotometría de absorción atómica la chapa tiene un contenido de 0,08 % de Carbono, 0,012 % de Manganeso, 0,015 % de Fósforo, 0,002 % de Azufre y 2,90 % de Silicio siendo éste último el elemento más importante que le confiere propiedades magnéticas a la chapa. Según lo indicado en la Tabla 1.
2. De la microscopia tanto transversal como longitudinalmente, se observó que los granos de este acero son muy grandes lo que facilita una circulación de mayor flujo trayendo consigo una elevada eficiencia del equipo, este tamaño está relacionado con la alta presencia de Ferrita e inclusiones en su matriz.
3. Con respecto a la evaluación de las normas se obtuvo que en Venezuela no existe norma que regule las condiciones de uso de las chapas magnéticas de granos orientados, y con apoyo a la norma española UNE-EN 10107 sobre las chapas magnéticas de orientado en estado final de suministro se consideró que estas chapas cumplen con las condiciones de uso, en base a certificados de calidad provenientes de las empresas extranjeras que distribuyen este material.

Referencias

- [1] E. STAFF DEL M.I.T. Circuitos Magnéticos y Transformadores. Editorial Reverte. Argentina, Noviembre de 1981.
- [2] SMITH, William. Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 3era Edición, España, 1998. Editorial Mc Graw Hill.
- [3] BOSSI, ANTONIO. «Operación y Mantenimiento de Transformadores de Potencia. Requerimientos de usuarios y Fabricantes».
- [4] ZIKMUND, William: Investigación de Mercados. 6ta. Edición, México, 1998. Editorial: Prentice Hall.
- [5] SHACKELFORD, James. Ciencia de Materiales para Ingenieros. 3era Edición, México, 1992. Editorial Prentice Hall.
- [6] REED-HILL, Robert. Principios de Metalurgia Física. 6ta Edición, México, 1976. Editorial C.E.C.S.A.
- [7] PANSINI, Anthoni. Transporte y Distribución de la Energía Eléctrica Tomo 1 y 2. Buenos Aires, 1975, Editorial GLEM.

- [8] BARREIRO, José Apraiz. *Aceros Especiales*. 5ta Edición. Madrid, 1975. Editorial DOSSAT.
- [9] ALLOY. «Metals Handbook., ASTM Internacional Properties and Selection Irons, Steels and High Performance». Volumen 1, 5ta. Edition. Año 1990.
- [10] KOSOW, I. L. «Máquinas Eléctricas y Transformadores». Editorial Reverte. España, 1982.
- [11] MOTA, JUAN y CONTRERAS, ELY. «Problemática de los Transformadores sumergidos en aceite». Tesis de grado. Escuela de Ingeniería Eléctrica. UC Valencia, 1985.
- [12] NORMAS PARA TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN. CADAFE. Caracas, 1979.
- [13] CORRALES MARTÍN, Juan. «Teoría, Cálculo y construcción de Transformadores». Editorial Labor. 3era Edición Rev. 1954 (la escuela de técnico electricista) Barcelona.