



## AVANCES EN LA APLICACIÓN DE NUEVOS MATERIALES EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA

**Eduardo Velázquez Castillo, M. Sc. Ing.**  
Dpto. de Ingeniería de Mantenimiento  
Central Hidroeléctrica de Itaipu  
Hernandarias – Paraguay

**Nora Díaz Mora, Dra. Ing.**  
LaMat - Laboratorio de Materiais  
UNIOESTE/PTI - Foz do Iguaçu  
Foz do Iguaçu - Brasil

### RESUMEN

El principio básico de funcionamiento de un transformador, basado en la ley de inducción de Faraday, por medio del sistema núcleo-bobinado, se mantiene inalterado desde su invención en el siglo XIX. Sin embargo, estos equipos han sufrido grandes modificaciones y evolucionado tremendamente en lo que se refiere al diseño, proyecto y desempeño, a juzgar por el incremento significativo de los niveles de tensión y potencia, así como una gran reducción de la masa, tamaño, niveles de pérdidas y de ruido, entre otros. Un análisis detallado de esa evolución indica que esas mejoras son atribuidas al uso de nuevos materiales y herramientas avanzadas en el proyecto, cálculos y procesos de fabricación. Así, en este trabajo se presenta un análisis de esa evolución y perspectivas futuras de los transformadores de potencia del punto de vista de la aplicación de materiales, sean estos metálicos, poliméricos, cerámicos y materiales compuestos.

**PALABRAS CLAVES:** Transformadores, nuevos materiales, evolución tecnológica.

### 1 INTRODUCCION

Probablemente el mayor avance en la electrotecnia se produjo en 1831, cuando Michael Faraday descubrió que un cambio en el flujo magnético induce una fuerza electromotriz en una bobina de alambre, principio este conocido como inducción electromagnética y en el cual se basa el funcionamiento de los generadores y transformadores. La tecnología actual de los transformadores remonta sus orígenes en los experimentos con transformadores monofásicos de distribución realizados en Hungría a principios de la década de 1880. El principio de funcionamiento de los transformadores de potencia no ha cambiado desde la construcción del primer transformador bifásico en 1889 por Mikhail Dolivo-Dobrovolsky de la AEG–Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft (Compañía de Electricidad General de Alemania) [1]. Sin embargo, se observa enorme evolución en lo que respecta a la elevación gradual de los niveles de voltaje y potencia, especialmente para transformadores de Alta (AT) y Extra Alta Tensión (EAT), como ilustra la Figura 1.

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

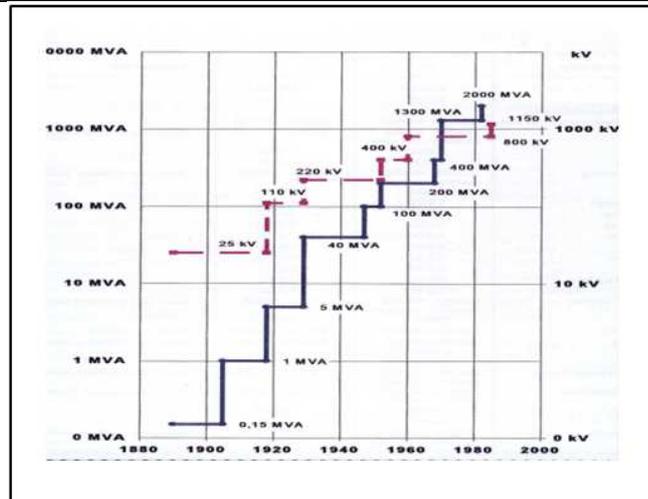


Figura 1: Evolución del voltaje y la potencia de transformadores [2].

Esa evolución ha sido alcanzada gracias a la reducción de pérdidas, tanto en el núcleo como en las bobinas, así como una gran reducción de masa, tamaño y niveles de ruido entre otros. Al mismo tiempo hubo grandes avances en el desempeño en general de los transformadores, con el aumento de la capacidad de sobre carga, mejor disipación térmica y mejores técnicas de mantenimiento y monitoreo de los principales parámetros de desempeño y consecuente aumento de confiabilidad y disponibilidad operativa. Debe ser destacado, el gran empeño por parte de los fabricantes, sumado al gran desafío por consolidar esta realidad con la necesidad, muchas veces, de reducir los costos de producción, para alcanzar un precio final competitivo del transformador, garantizando la calidad requerida [3].

Un análisis detallado indica que el destacado avance y mejoras son atribuidas al uso de herramientas altamente sofisticadas en los procesos de fabricación y la aplicación de materiales avanzados, los cuales son típicamente materiales tradicionales cuyas propiedades fueron mejoradas grandemente por la calidad de las materias primas y/o proceso de fabricación, o se tratan de nuevos materiales de alto desempeño recientemente sintetizados. Se debe destacar además que el desarrollo de las ciencias de la computación y la construcción de poderosos microcomputadores, han permitido la utilización de herramientas computacionales sofisticadas en la aplicación de nuevas soluciones de proyecto, así como a la introducción de procesos más eficientes en la fabricación de los transformadores y sus componentes básicos, como ser las chapas del núcleo y los conductores para las bobinas [1-3].

En ese sentido, actualmente, cálculos del dimensionamiento de transformador establecen modelos matemáticos que representan los comportamientos electromagnético y térmico y al mismo tiempo, poderosos programas de simulación que permiten excelentes aproximaciones de cualquier situación de funcionamiento durante la vida del transformador y permiten conocer mejor su comportamiento, de la manera más fiel posible a las condiciones reales de operación, permitiendo introducir mejoras en los puntos considerados más críticos como ser el refuerzo de la aislación y otros.

Por otro lado se observa en las últimas décadas, un comprometimiento de todos los agentes en especificar, proyectar y fabricar transformadores considerando aspectos ecológicos, que se ilustra, por ejemplo, con la preocupación de minimizar o hasta eliminar los impactos ambientales, introduciendo nuevos fluidos aislantes como el aceite vegetal, en alternativa al aceite mineral por sus características biodegradables y especialmente no inflamables, denominados de fluidos ecológicamente correctos.

**X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012**

El ingeniero, en cualquier especialidad, como parte de su trabajo trata de materiales que incluyen las especificaciones, diseño, adquisición, capacitación, inspección de aceptación en fábrica y supervisión del desempeño de los transformadores en servicio, motivo por el cual uno de los objetivos de este trabajo es incentivar la participación más activa del cliente o usuario final, en lo referente al conocimiento de nuevas tecnologías de materiales a considerar en las especificación técnica y el *design review*, especialmente en los procesos de adquisición de nuevas unidades, así como también, en reparos o revitalización de transformadores ya instalados. En este trabajo es presentada una revisión sobre la aplicación de nuevos materiales en transformadores de potencia, así como también son citadas algunas perspectivas tecnológicas futuras realmente innovadoras, como por ejemplo, núcleo de material amorfo o material nano cristalino, superconductores de alta temperatura (HTS) para las bobinas.

**2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR**

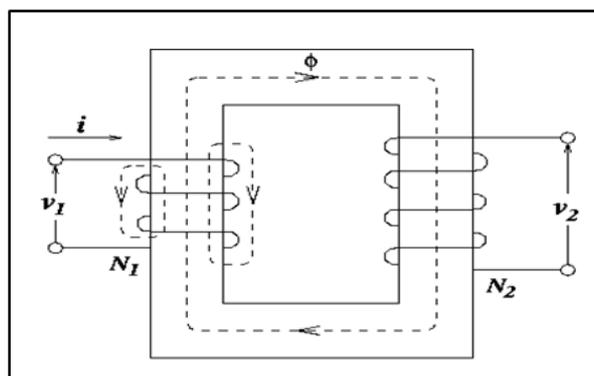
El transformador es una máquina eléctrica, sin partes móviles, que por medio de inducción electromagnética transfiere energía eléctrica de uno o más circuitos (primarios) para otros circuitos (secundarios, terciarios), manteniendo la misma frecuencia, pudiendo haber alteración de los valores de tensión y corriente [4]. El funcionamiento de este equipo se basa en la ley de inducción de Faraday, la cual expresa que la fuerza electromotriz ( $\epsilon$ ) inducida en una bobina es igual a la tasa de variación del flujo magnético ( $\Phi$ ) con el tiempo ( $t$ ) que en forma matemática es:

$$\epsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Así, para el caso de N espiras:

$$\epsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

Como se muestra en la Figura 2, el transformador consta básicamente de dos devanados, siendo el primario el responsable de la entrada de la fuerza electromotriz variable aplicada ( $V_1$ ) que genera un flujo magnético variable ( $\Phi_1$ ), el cual circula hasta el devanado del secundario ( $\Phi_2$ ), induciendo una fuerza electromotriz ( $V_2$ ) también variable.



**Figura 2: Diagrama esquemático do transformador**

Los transformadores reales requieren deducciones mucho más complejas que el modelo didáctico ilustrado, sin embargo, el principio de funcionamiento se mantiene inalterado desde su invención.

### 3. APLICACION DE MATERIALES EN TRANSFORMADORES

Los materiales son sustancias que debido a sus propiedades son útiles para diversas aplicaciones industriales, tales como estructuras, máquinas y dispositivos. Para cada aplicación propiedades específicas son de interés, por ejemplo para el cobre (Cu) electrolítico interesan las propiedades eléctricas y para los cables de aluminio, acero y cobre, usados en líneas de transmisión interesan resistencia mecánica y conductividad. En la fabricación de los transformadores de potencia se destacan los materiales metálicos como cobre puro y la aleación acero-silicio en el conjunto bobinado-núcleo (parte activa). Como existe la necesidad de aislamiento eléctrico y dispersión térmica, el conjunto bobinado-núcleo está sumergido en aceite mineral aislante. Al mismo tiempo los conductores del bobinado son envueltos en tiras de papel aislante tipo kraft termo estabilizado o no que forman la aislación entre las espiras.

#### 3.1 Los conductores eléctricos

Hasta hoy todos los arrollamientos se manufacturan con conductores de cobre electrolítico de máxima pureza. La amplia utilización del cobre en sector eléctrico se justifica por ser este el metal reconocido internacionalmente desde 1913 como el estándar con 100% de conductibilidad. Esto significa que el cobre proporciona una mayor capacidad para conducir la corriente eléctrica para el mismo diámetro de cable que cualquier otro metal comúnmente empleado como conductor de la ingeniería eléctrica. Las características de interés en este material y que aseguran una posición prominente entre los metales conductores son entre otras, la conductividad (superado apenas por Ag mas cuyo precio alto no permite el uso en grandes cantidades), resistencia dieléctrica, propiedades mecánicas favorables y baja oxidación para la mayoría de aplicaciones.

El cobre es uno de los primeros metales utilizado por el hombre y por sus características se convirtió, en un descubrimiento fundamental en la historia de la evolución humana. Se cree que alrededor de 13.000 BC fue encontrado en la superficie de la Tierra en la forma de "cobre nativo", siendo inicialmente utilizado como un sustituto de la piedra como herramientas de trabajo, armas y objetos cotidianos. A pesar de su antigüedad, el cobre ha mantenido junto con los metales más recientes, un papel preponderante en la evolución de la humanidad, siendo utilizado en todas las etapas de las revoluciones tecnológicas. Sin embargo fue solo a partir de 1950 que el cobre fue reconocido como metal conductor eléctrico.

En el tipo de conductor para la construcción de bobinados de transformadores no ha habido grandes cambios, a no ser por el tipo de bobina, sea de secciones rectangulares (planchuelas) o conductores continuamente transpuestos (C.T.C.) que presentan sus ventajas y desventajas de acuerdo a la aplicación específica dependiendo de la potencia y la tensión. Según los fabricantes, los C.T.C gracias al espesor muy pequeño de aislamiento de los conductores individuales, poseen varias ventajas en comparación con conductores convencionales, tales como la reducción de pérdidas por corrientes de Foucault y una distribución más uniforme de la temperatura, entre otras.

#### 3.2 Material del núcleo

De hecho, para ser optimizado el transformador, en términos de desempeño y de dimensiones, principalmente cuando se trata de AT y EAT, la parte fundamental está localizada en el núcleo y es función de la calidad de la chapa empleada.

Un inmenso esfuerzo y un capital formidable se invirtieron en investigación para producir una placa de acero que tuviera un rendimiento satisfactorio, esta solución solo fue encontrada con advenimiento de la aleación de acero al silicio (Si) con porcentaje máxima de Si en torno de 3%, con laminación a frio y presentando textura cristalina (grano orientado). Esa aleación tiene como principal característica la elevada permeabilidad

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

magnética, lo cual implica en pocas perdidas durante la sollicitación, por su vez, el Si cuando agregado al hierro, eleva la resistividad del material, reduciendo de esta forma las corrientes parásitas.

Las propiedades magnéticas de un material son determinadas por la configuración electrónica de los átomos, su estructura cristalina y la microestructura (dominios magnéticos). El grano orientado de los aceros eléctrico con 3% de Si es obtenido al someter los rollos de acero a una temperatura de la orden de 1.200 ° C por cinco a siete días, de esta forma los granos grandes crecen en una determinada dirección en que las pérdidas son menores que en otras, minimizando cualquier restricción del flujo magnético y con la conversión de 99% de la energía alimentada al transformador [5].

Las mejoras realizadas en aceros eléctricos en los últimos 50 años, incluyen, entre otros avances optimización de las propiedades mecánicas de las laminas de grano orientado (GO), perfeccionamiento de los procesos metalúrgicos de los aceros, una mejora en la orientación de los granos y reducción continua en el espesor de las laminaciones para reducir el componente de pérdida por Foucault [4]. En la figura 3a, es mostrada la evolución cronológica de las chapas del núcleo de transformadores con la disminución de las perdidas y en b) Evolución del núcleo de grano orientado [2]. En el Brasil, esta tecnología prácticamente se inició con los transformadores suministrados a la ITAIPU Binacional, o sea es una evolución relativamente reciente y muy significativa, al referirse a transformadores de AT y EAT [3].

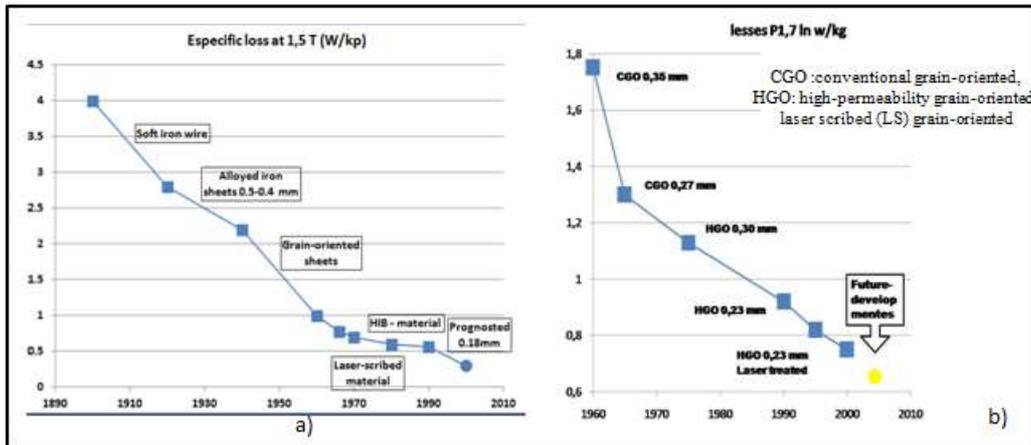


Figura 3: Evolución del material del núcleo de transformador [2].

### 3.3 Materiales aislantes

El aceite mineral se ha utilizado como medio aislante y refrigerante en transformadores desde 1890, su características principal es el aislamiento eléctrico y buena conductibilidad térmica [6]. A pesar de todos los avances tecnológicos y el desarrollo de nuevos materiales para la construcción de los cables, condensadores, transformadores especiales, entre otros, parece intrigante que el antiguo conjunto aceite-papel usado en los transformadores convencionales como sistema de aislamiento continúe siendo utilizado y todavía no se vislumbren perspectivas de substitución. Esta tendencia vino a ser reforzada por al utilizar aceites parafínicos y aceites regenerados. Esto puede ser atribuido básicamente a la eficacia del sistema y al costo reducido sobre otros medios dieléctricos. En la figura 4 son presentados algunos eventos de la aplicación del aceite aislante [6,7].

A pesar de ser reconocida la eficiencia técnica y económica del aceite mineral aislante, en el caso de accidentes por derramamiento o incendio, existe gran preocupación por las consecuencias de los impactos ambientales y económicos que puede provocar. En ese sentido en las últimas décadas vienen siendo

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

desarrollados y utilizados fluidos a base de aceites vegetales como alternativa de sustitución. Estos fluidos a pesar de esas características biodegradables y renovables y ser considerados ecológicamente correctos, ven su utilización limitada por varios factores, siendo los principales el precio, la falta de conocimientos técnicos y la falta de criterios para el monitoreo de su desempeño en el campo (mantenimiento predictivo). La sustitución del aceite mineral por aceite vegetal aislante en equipos de alta tensión, aunque muy ventajoso del punto de vista ecológico, sólo debe realizarse después de análisis criterios y sólo con la aprobación previa del proyectista del transformador [7].

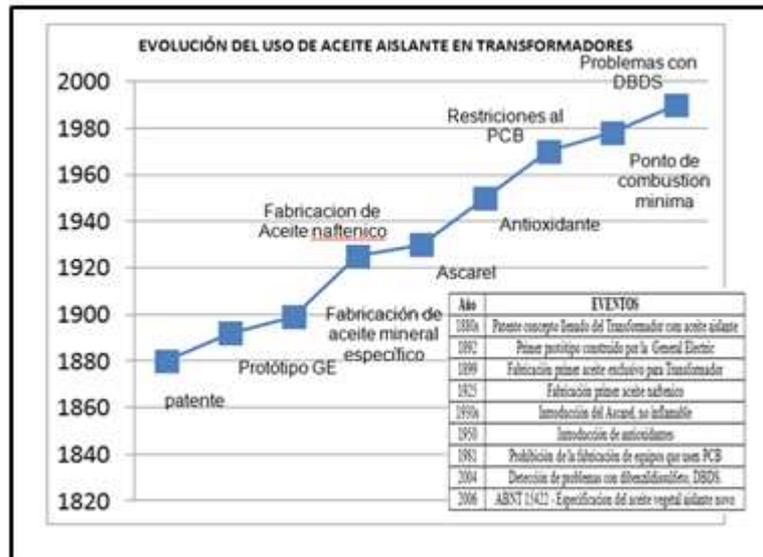


Figura 4: Evolución del uso de aceite aislante en transformadores

El papel tipo kraft (desarrollado en 1884) es un compuesto celulósico y funciona como un buen aislante de los conductores, el que es usado en el sector eléctrico es sometido a tratamientos específicos para que su resistencia térmica sea aumentada (55°C para 65°C) y el producto final es llamado de papel kraft termo estabilizado. El mismo fue introducido en el mercado de los EE. UU. a finales de los años 50. Para este material las características de interés son entre otras, el espesor, la resistencia a la tracción, resistencia a la rotura, la porosidad, rigidez dieléctrica, grado de polimerización, etc.

#### 4. LAS NUEVAS TECNOLOGIAS PARA TRANSFORMADORES DE POTENCIA: LOS NUEVOS MATERIALES

La creación y utilización de nuevos materiales comenzó su auge en los años 60 como una necesidad al posible agotamiento de las materias primas que sustentaron el desarrollo de las principales potencias mundiales. Entre los principales estímulos para esa corrida se destaca la industria bélica, aeronáutica, la carrera espacial y el desarrollo de la ingeniería nuclear y otras formas de energía. Las investigaciones destacan la búsqueda de propiedades específicas orientadas a alcanzar la eficiencia global del proceso en aspectos como la resistencia a altas Temperaturas, resistencia mecánica, resistencia a la corrosión, así como eficiencia energética a la par de la reducción del peso, la densidad, o bien, la capacidad conductora de electricidad ampliada. Específicamente tratándose de transformadores de potencia las mejoras en las características de los materiales y accesorios necesariamente serian del material del núcleo, los conductores, aislamientos sólidos, líquido aislante/refrigerante, acero estructural y accesorios.

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

En el caso de los conductores se comprueban algunas propuestas para cambio de proyectos y algunos autores visualizan la utilización de Conductor Plata - Cadmio, Superconductores (LTSC, HTSC) y Nanotubos entre otros [1,2,8].

Otras perspectivas consisten en el cambio de proyecto, y en esta línea uno de los grandes fabricantes de equipos eléctricos anuncia la fabricación de un nuevo tipo de transformador de alta tensión sin aceite (a seco) transformador Dryformer, proyectado en primer lugar para tensiones del primario de 36 a 145 kV y potencias nominales de hasta 150 MVA. Este difiere de los transformadores convencionales en el tipo de arrollamiento que es formado con conductores circulares aislados por polímero y semiconductores. Según el fabricante este proyecto presenta entre otras ventajas, la simplificación del diseño y los procesos de fabricación y debido a la ausencia de aceite aislante se elimina el peligro de contaminación en caso que se produzcan daños en el transformador y se reduce mucho el riesgo de incendio o explosión. Otra de las ventajas de los conductores cilíndricos de ese modelo es que el campo eléctrico se distribuye uniformemente y se evitan las descargas parciales. El núcleo es parecido al de los transformadores convencionales de aceite/celulosa y utiliza el mismo tipo de laminado con la única diferencia es que se aplica pintura anticorrosión al conjunto ya montado para contrarrestar la ausencia de aceite [9]. En la figura 5 es mostrado un esquema de ese tipo de conductor.

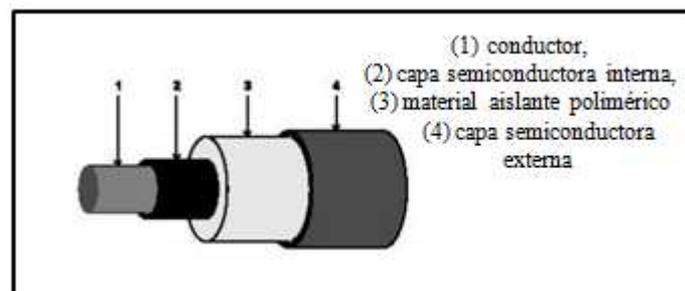


Figura 5. Cabo de conductor cilíndrico [9]

Una de las grandes perspectivas de evolución del transformador a mediano plazo está centrada en el uso de superconductores para los arrollamientos. Los superconductores son materiales cuya resistividad cae bruscamente para cero cuando el material es enfriado a temperaturas suficientemente bajas frecuentemente de la misma orden de aquella de licuefacción del Helio [10-12]. Esto significa que, a diferencia de los conductores más conocidos, un superconductor puede llevar una corriente indefinidamente sin perder ninguna energía. Hoy en día, las mayores aplicaciones de éxito de los superconductores sigue siendo en los potentes electroimanes que se utilizan en resonancia magnética (MRI), resonancia magnética nuclear (NMR), en experimentos de alta energía física como los imanes que dirigen el haz de los aceleradores de partículas, y en la construcción de circuitos digitales basados en tecnología cuántica de flujo rápido (RF).

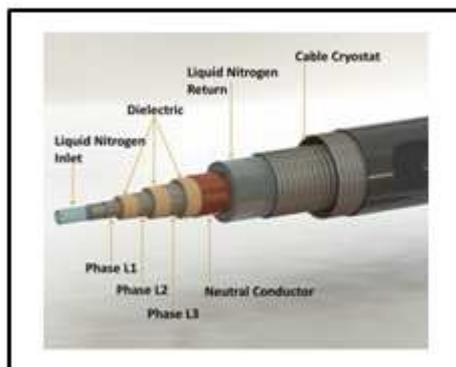
El descubrimiento del primer material superconductor se llevó a cabo en 1911 juntamente con el descubrimiento de la temperatura de licuefacción del helio, 1,7 Kelvin. En la década de 1960, el descubrimiento del superconductor NbTi y la unión Josephson marcaron el comienzo de una nueva era en la fabricación que los dispositivos superconductores prácticos. A pesar del enorme éxito de NbTi y materiales similares, una aplicación más amplia de los superconductores ha sido restringido por la necesidad de enfriamiento a temperaturas muy bajas.

A finales de 1986 Bednorz J. Georg y K. Alexander Müller, dos investigadores de IBM en Zurich, anunciaron el descubrimiento de un óxido superconductor a 30K, con lo que se iniciaba la era de los "superconductores de alta temperatura" (HTS). Luego, en 1987, Paul Chu de la Universidad de Houston

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

descubrió que el YBCO ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ), que se convirtió en un superconductor a tan sólo 90K, temperatura que puede ser alcanzada utilizando  $\text{N}_2$  líquido, un refrigerante industrial común.

Para cabos conductores de alta tensión el uso de superconductores parece ser una realidad. En enero de 2012, fue anunciado el lanzamiento del “AmpaCity”, que consiste en la sustitución de cabos de alta tensión por un cabo superconductor en la red de distribución de Huerth (Alemania). Estos son construidos de superconductores (HTS) conforme mostrado en la figura 6. Según el fabricante, la característica esencial de ese cabo es su capacidad de conducción de corriente ser 150 veces la del cobre de mismas dimensiones [12].



**Figura 6. El cable concéntrico superconductor se enfría con  $\text{N}_2$  líquido (Foto: Nexans) [12].**

Se supone que transformadores construido utilizando la tecnología HTS, serían más pequeño y más ligero, y capaces de experimentar sobrecargas sin pérdida de vida útil debido al tipo de aislamiento, y un beneficio adicional sería un aumento en la eficiencia de potencia de los transformadores HTS sobre transformadores convencionales, debido a la resistencia de los superconductores ser prácticamente cero eliminando la componente de pérdidas de carga  $I^2R$ . Sin embargo, pensar en el reemplazo del cobre de los arrollamientos por superconductores (HTS), representaría una desviación significativa en las temperaturas de operación de los transformadores convencionales para el rango de 116K a 144K (temperaturas predominante del medio refrigerante) y por tanto, se requiere avances en la tecnología de refrigeración específicamente dirigidos a su uso en transformadores.

El descubrimiento de la primera aleación amorfa con características de material magnético macío ocurrió en 1967 con composición Fe-P-C y obtenida por solidificación rápida del fundido, a partir de ese descubrimiento se ha desarrollado de una gran variedad de estudios sobre ligas amorfas correlacionando composición química y propiedades magnéticas [13-15]. La producción de aleaciones amorfas potencialmente aplicables en los núcleos de los transformadores solo comenzó en 1975 pero su comercialización para este tipo de aplicación, sólo se produjo en 1976, cuando fue construido el primer transformador de distribución con material de núcleo amorfo (TDMA), en el Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology (EE.UU.). Para alcanzar el estado vítreo el material fundido es resfriado hasta alcanzar el estado sólido sin cristalizar, o sea presentando disposición irregulares de los átomos. En los materiales cristalinos como metales, los átomos ocupan posiciones específicas en reticulados que son organizados de forma tridimensional repetitiva periódica, y normalmente caracterizados por parámetros tales como dirección y planos cristalográficos, parámetro de red, célula unitaria, estos conceptos no tienen significado para un material estructura vítrea. En este tipo de estructura como los átomos están dispuestos aleatoriamente y no muestran ninguna orientación es facilitada la orientación de los dominios magnéticos. Estos materiales se comenzaron a fabricar comercialmente en 1971 con la aleación Metgals® 2826 ( $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ ) de la Allied Signal, Inc. Consistiendo en cintas o chapas de material amorfo con un espesor de entre 20 a 60  $\mu\text{m}$ , y de ancho de hasta 25 cm [16]. Los parámetros que definen este tipo de material como sustituto superior al de los materiales magnéticos tradicionales en transformadores son: bajo

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

campo coercitivo,  $H_c$ , alta imantación de saturación,  $M_s$ , alta permeabilidad,  $\mu$ , sobre todo en alta frecuencia, y baja constante de magnetostricción,  $\lambda$ . En la figura 7 muestra una comparación de la eficiencia un transformador convencional versus un transformador con núcleo de liga de metal amorfo ambos de 2000kVA.

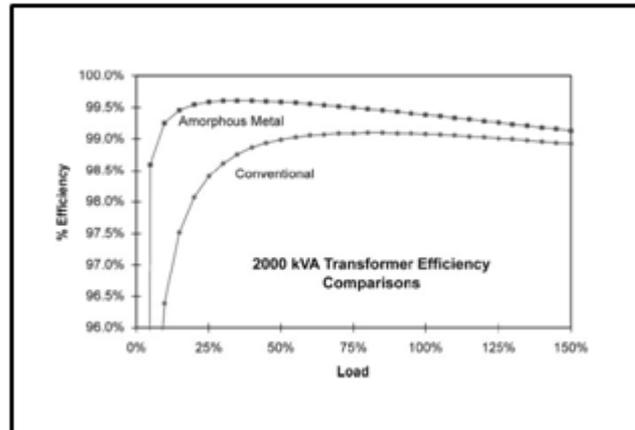
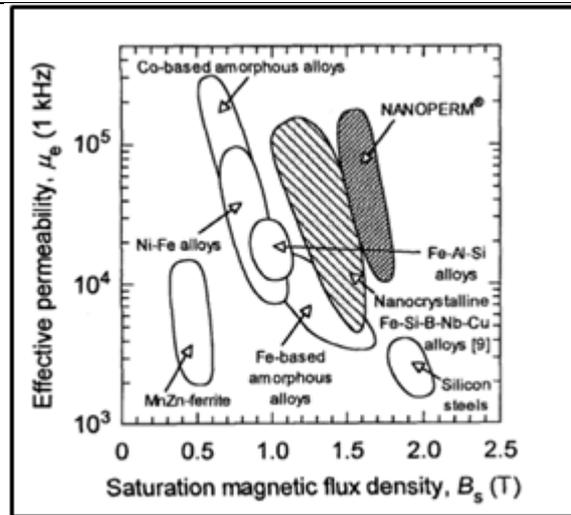


Figura 7. Eficiencia entre un transformador de núcleo convencional y uno de núcleo amorfo [14].

En 1988, investigadores de la Hitachi Metals descubrieron un nuevo tipo de material con propiedades magnéticas blandas superiores a las de los vidrios metálicos. Se trata de sistemas con estructuras nanocristalinas obtenidos a partir de la cristalización controlada de aleaciones amorfas y que poseen granos de dimensiones entre 10 y 20 nm inmersos en una matriz amorfa. Estos nuevos materiales nanocristalinos mejoran las propiedades de su precursor amorfo mostrando una alta imantación de saturación, magnetostricción casi nula y extremadamente baja fuerza coercitiva. El material desarrollado por la Hitachi tiene el nombre comercial de FINEMET y consiste en un vidrio metálico de composición química  $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Cu_1Nb_3$  que se somete a un tratamiento térmico a  $550^{\circ}C$ , que propicia una estructura interna bifásica: la fase cristalina (o nano cristalina), que representa un 60% de total del volumen del material, es formada por nanogranos de fase  $\alpha-Fe(Si)$  de  $\sim 20$  nm de diámetro con un contenido de Si cercano al 20% (i.e.  $\alpha-Fe_{80}Si_{20}$ ), y la matriz amorfa de composición rica en Fe, B y Nb [15]. Gracias al valor negativo de  $\lambda$  de la fase cristalina y positivo de la fase amorfa se logran valores de magnetostricción prácticamente despreciables que junto con una mayor magnetización de saturación (1,2-1,5 Tesla) una fuerza coercitiva de  $0,5 Am^{-1}$  y una permeabilidad magnética que excede  $10^4$  para una frecuencia de 1kHz, hace de estos materiales los más blandos conocidos por lo menos a nivel productivo. Actualmente varias empresas comercializan pequeñas bobinas, transformadores y filtros magnéticos confeccionados con material nanocristalino [15,16]. En la figura 8 se comparan los materiales magnéticos blandos tradicionales con los nuevos amorfos y amorfos nanocristalinos, se observa que cuanto mayor es la permeabilidad y la imantación de saturación a la vez, estos serán mejores materiales magnéticos blandos [16].

A pesar de que estos nuevos materiales: núcleo amorfo, amorfo nano cristalino y arrollamientos construidos de material superconductor, prometen grandes avances y fantásticas perspectivas de futuro para los nuevos transformadores, todavía tienen que ser superadas barreras técnicas y económicas para que se tornen suficientemente atractivos al punto de substituir la tecnología actual. Los avances recientes en el desarrollo de materiales superconductores de alta temperatura han levantado esperanzas sobre el uso de esos materiales a temperatura ambiente para fabricar bobinas de transformadores, sin embargo mismo que esas temperaturas vengán a ser alcanzadas se especula sobre la viabilidad económica y la practicidad de operar a temperaturas criogénicas, en lo que supone un drástico cambio en el modo de alimentación de energía o de la transmisión por superconductores.

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012



**Figura 8. Comparación de materiales magnéticos blandos tradicionales (indicados sin relleno) con los nuevos materiales magnéticos amorfos y nano cristalinos (regiones con distintos rellenos) [14].**

Las aleaciones amorfas e nanocristalinas a pesar sus excelentes propiedades magnéticas, por causa de las exigencias del proceso de fabricación que tan solo pueden ser producidas en espesuras muy finas, indican que su utilización todavía no es viable económicamente en la construcción de grandes transformadores.

Finalmente, con el transformador entrando en su segundo siglo de servicio, no es fácil de predecir el rumbo de su evolución, esto porque los circuitos en estado sólido han reducido o eliminado la necesidad de transformadores en pequeños aparatos electrónicos, sistemas de sonido y televisión. La disponibilidad de dispositivos de estado sólido mucho mayores ha hecho factible, en algunos casos, transmitir alto voltaje en CC en lugar de AC, a pesar de que aún se requieren transformadores en el proceso de conversión. Estos son indicios, sin embargo, que dispositivos de estado sólido podrían ocupar el lugar de los transformadores en algunas de las actividades de los sistemas de potencia [1]. En vista de tales avances y la velocidad de los cambio tecnológico, sería temerario sostener que el transformador estará en el sistema por siempre, pero parece probable que sobreviva por mas un siglo por ser silencioso, eficiente y discreto en apoyo a los sistemas de energía eléctrica.

## 5. CONSIDERACIONES Y CONCLUSIONES

Fue presentada una revisión sobre la evolución de los principales materiales usados para la fabricación de transformadores de potencia y también algunas informaciones sobre el desarrollo de nuevos materiales que proponen tecnologías innovadoras como por ejemplo, núcleo de material amorfo o amorfo nanocristalino y superconductores de alta temperatura (HTS) para las bobinas. El principal objetivo fue incentivar la participación más activa del cliente o usuario final, en lo referente al conocimiento de nuevas tecnologías de materiales a considerar en las especificaciones técnicas y el *design review*, especialmente en los procesos de adquisición de nuevas unidades, así como también, en reparos o revitalización de transformadores ya instalados.

Es constatado que aunque esas nuevas tecnologías presentan extraordinarias ventajas y ya sean más o menos realidad en algunas aplicaciones, para ser incorporadas a nuevos proyectos de transformadores de potencia de grande porte todavía tienen que superar las barreras técnicas/comerciales para una producción en escala industrial, indispensables para su aplicación real. No obstante estas verdades técnicas, las mismas tienen que

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

consideradas dentro de un contexto económico de mercado para ser aplicadas, lo cual influye directamente en la calidad y confiabilidad de estos importantes equipos.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] J. W. Coltman, "The Transformer (historical overview)," IEEE Industry Applications Magazine, vol. 8, no. 1, Jan.-Feb. 2002, pp. 8-15.
- [2] R. BAEHR, "Transformer technology: state of art and trends for future developments" Electra, 2001, 198, (13), pp. 13-19.
- [3] L. A. Pradenas, Consultor Autonomo en transformadores de potencia de la Itaipu Binacional .Sao Paulo-SP- Brasil, Julio 2012.
- [4] J.H. Harlow, Electric power transformer engineering. Edited by James H. Harlow. (The Electric Power Engineering Series, CRC Press LLC, USA, 2004, pág. 481.
- [5] F. J. G. Landgraf, Propriedades Magnéticas de aços para fins elétricos. In: Ivani Bott; Paulo Rios; Ronaldo Paranhos. (Org.). Aços: perspectivas para os próximos 10 anos. 1a ed. Rio de Janeiro, 2002, pág.109-128.
- [6] MILASH, M. Manutenção de transformadores em líquido isolante. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1984, pág.354.
- [7] W.Uhren, "Aplicação de óleo vegetal como meio isolante em equipamentos elétricos, em substituição ao óleo mineral". Dis. Mestrado, PRODETEC, Curitiba, 2007.
- [8] A.Cancino Quiroz y R Ocon Valdez. "El futuro en la tecnología de transformadores de potencia". INDUSTRIAS IEM. [http://www.cigre.org.mx/uploads/media/FTM\\_Mexico-CIGRE-parte1.pdf](http://www.cigre.org.mx/uploads/media/FTM_Mexico-CIGRE-parte1.pdf) (accesado 10/08/2012).
- [9] T. Andersson, S. Forsmark, and A. Jaksts, "Dryformer™, Nuevo transformador de potencia, sin aceite y con bajo impacto medioambiental". Revista ABB 3/2000, pags. 59-64.
- [10] KITTEL, C. Introdução à física do estado sólido. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005. 578 p.
- [11] Narlikar, A.V. -High temperature superconductivity 2 engineering applications. Springer, NY, 2004.
- [12] [http://www.nexans.com.br/Corporate/2012/Nexans\\_Ampacity\\_GB\\_final](http://www.nexans.com.br/Corporate/2012/Nexans_Ampacity_GB_final). (Consultado 07/2012).
- [13] R. Hasegawa, "Present status of amorphous soft magnetic alloys", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 215-216 (2000) 240-245.
- [14] A.Makino, T. Hatanai, Y. Naitoh, T.Bitoh, A. Inoue and Masumoto, T. "Applications of Nanocrystalline Soft Magnetic Fe-M-B (M = Zr, Nb) Alloys NANOPERM®". IEEE Transactions on Magnetics, vol. 33, No. 5, 1997, pag. 3793-3798.
- [15] J. A. Moya, -"Vidrios Metálicos y Aleaciones Nanocristalinas: Nuevos Materiales de Estructura Avanzada". Cuadernos de la Facultad, n. 4, 2009,pags.1-21.
- [16] Luciano, B. A. y Castro de, W. B.- Transformadores de distribuição de energia elétrica com núcleo de metal amorfo. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.6.1 (2011) 01-05.



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

**X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ**  
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

---