



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN CON NÚCLEO DE METAL AMORFO:
INVESTIGACIÓN Y DISEÑO TEÓRICO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

BASILIO ANDRÉS NAJLE ORMAZÁBAL

PROFESOR GUÍA:
NELSON MORALES OSORIO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ARIEL VALDENEGRO ESPINOZA
MARIO VERGARA YÁÑEZ

SANTIAGO DE CHILE
JUNIO 2013

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniero Civil Electricista
POR: Basilio Andrés Najle Ormazábal
FECHA: 24-06-2013
PROFESOR GUÍA: Nelson Morales

TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN CON NÚCLEO DE METAL AMORFO: INVESTIGACIÓN Y DISEÑO TEÓRICO

Para el diseño y fabricación de transformadores eléctricos de distribución, el acero al silicio de grano orientado en los núcleos magnéticos es el más ampliamente utilizado, dadas sus características de gran permeabilidad a altas densidades de flujo, bajas pérdidas en vacío y ventajas económicas.

No obstante, han surgido alternativas a este material que ofrecen beneficios únicos y novedosos. Éste es el caso de los núcleos fabricados con láminas de metal amorfo, los cuales entraron en circulación a comienzos de los '80, teniendo muy buena recepción en países como EEUU, Japón, China e India.

El objetivo principal de este tema de memoria es validar el uso de núcleos fabricados con acero amorfo, con respecto a aquellos elaborados con aceros tradicionales, tanto en el aspecto técnico (teórico), así como económico. Para ello, se propone el desarrollo en dos ejes principales; el primero, una etapa de investigación, donde se establecen características básicas del metal amorfo, tanto físicas como químicas; y la segunda, el diseño teórico del transformador de distribución con este tipo de núcleo, respetando las normativas vigentes y estableciendo patrones básicos para la confección de este tipo de equipos.

Se propone un diseño de núcleo enrollado con láminas de metal amorfo para transformadores de distribución monofásico, basado en las características de la aleación Metglas 2605SA1, realizando dos simulaciones de cálculo de parte activa: un transformador de 15 kVA, 23000/231 V y transformador de 25 kVA, 13200/231 V. En ambos casos los diseños simulados cumplen con los estándares normativos mundiales y revelan las ventajas de este tipo de material con respecto al acero al silicio de grano orientado, tan ampliamente tratados en la literatura técnica: reducción de pérdidas en vacío del orden de 75 – 85%; reducción de corriente de excitación en torno al 75 – 85%; confiabilidad del transformador similar a los casos convencionales (vida útil estimada de 30 años); entre otros.

El análisis se complementa con una evaluación económica mediante el TOC (Total Ownership Cost) que incluye el costo inicial del equipo (costos por materias primas y mano de obra) más un costo de operación (valorización en el tiempo de las pérdidas en vacío y en carga). En el caso de las simulaciones de los transformadores con núcleo amorfo, se realizan dos ensayos para cada equipo considerando dos valorizaciones de pérdidas distintas obtenidas de la literatura y del propio fabricante de la cinta amorfa. En ambas situaciones se obtiene un TOC del transformador amorfo más bajo que el acero tradicional, en porcentajes que varían entre 0,5% y 6% aproximadamente. Estos valores crecen aún más cuando el factor de carga disminuye, acercándose a cero.

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a mis padres, por la oportunidad que me dieron de estudiar, por brindarme apoyo en todo momento en el camino que afortunadamente estoy finalizando. También agradezco a mis hermanos por su compañía, y especialmente en estos últimos años, por su persistencia para que no perdiera el rumbo y lograra el objetivo.

Agradezco al profesor guía Nelson Morales, porque en todo momento, incluso en aquellos más complicados, estuvo abierto a escucharme y darme una oportunidad cuando más lo necesitaba.

Agradezco también a los miembros de la comisión Sr. Ariel Valdenegro y Mario Vergara, por sus acertadas observaciones y por demostrar interés en el presente trabajo de memoria.

Agradezco a mi Sisti Margarita, que desde que partió siempre ha sido una inspiración inconmensurable.

Finalmente, agradezco a mi novia Valeria, por acompañarme, apoyarme, confiar y creer en mí, e incluso retarme en la última etapa de mi vida universitaria. Sin su ayuda y compañía llegar hasta este punto simplemente no hubiese sido posible. Gracias por tu amor y paciencia tan infinita y honesta. No tengo ninguna duda en decir que este éxito es en buena parte gracias a ti.

Tabla de Contenido

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2: DESARROLLO Y CARACTERÍSTICAS DE LA ALEACIÓN AMORFA EN EL MERCADO DE LA DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA.....	3
Transformadores Eléctricos en la Industria.....	4
Conceptos básicos de un transformador	6
Aspectos Constructivos de un Transformador.....	7
Aspectos Técnicos de un Transformador	10
Aspectos Económicos de un Transformador	12
Nuevas Tecnologías.....	14
Fundamentos Teóricos de Núcleos en Transformadores Eléctricos	17
Conceptos Teóricos de un Núcleo Magnético	18
Propiedades Magnéticas	19
Ciclo de Histéresis	20
Pérdidas Magnéticas	21
Propiedades y Características del Metal Amorfo.....	24
Origen y Evolución.....	24
Composición y Formación.....	27
Características del Metal Amorfo.....	30
Comparación de Metal Amorfo con Aceros Convencionales en Transformadores de Distribución	35
Situación Actual Mundial.....	39
Proyección del Mercado	40
CAPÍTULO 3: DISEÑO DE PARTE ACTIVA PARA NÚCLEOS DE METAL AMORFO EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN.....	42
Empleo del Acero Amorfo en Transformadores de Distribución	42
Factores incidentes en la Aplicación del Metal Amorfo	42
Requerimientos exigidos a un Transformador de Distribución con Acero Amorfo.....	42
Efectos del Metal Amorfo en el Diseño del Transformador	43
Consideraciones Previas y Evaluación de Tipos de Diseño.....	48

Núcleo Cruciforme	49
Núcleo Toroidal.....	50
Núcleo con Gaps Distribuidos.....	51
Núcleo con Junturas Traslapadas	54
Núcleo Apilado.....	56
Desarrollo de Programa de Cálculo de Parte Activa para Metal Amorfo	58
Metodología de Cómputo	61
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS TÉCNICO – ECONÓMICO DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO CON NÚCLEO AMORFO.....	64
Simulaciones con Software de Cálculo de Parte Activa para Metal Amorfo	64
Resultados Obtenidos	65
Análisis de Resultados.....	67
Evaluación Económica de los Diseños Simulados.....	70
Aplicación del TOC.....	71
Incidencia del Factor de Carga del Transformador	75
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	79
Conclusiones Generales	79
Oportunidades de Mejora / Desafíos Futuros.....	83
ANEXOS	87
Anexo A: Curvas patrones de acero al silicio de grano orientado, para distintas frecuencias y espesores comerciales	87
Anexo B: Curvas patrones de aleación amorfa basada en hierro Metglas 2605SA1 y 2605HB1M.....	96
Anexo C: Curvas de comparación de características entre aceros al silicio de grano orientado y acero de aleación amorfa	104
BIBLIOGRAFÍA	84

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos 30 años el problema del ahorro de energía, la creciente demanda por este servicio y los aspectos técnicos – económicos asociados, han sido el desafío principal de investigadores de todas las ciencias, que se han esforzado en satisfacer esta nueva necesidad del mundo moderno.

Aunque los equipos de generación y uso de la energía eléctrica (tales como generadores, motores y transformadores) son aparatos relativamente eficientes, el total de energía anual desperdiciada en su uso es muy significativa, debido a la inmensa cantidad de estos equipos en servicio, así como por la incorporación sostenida de nuevas unidades a los sistemas eléctricos de transmisión y distribución.

La industria, dentro de las variadas problemáticas existentes, ha centrado su atención en el desarrollo de tecnologías que permitan aunar ambos conceptos fundamentales: el ahorro de energía y la preocupación por el medio ambiente, con la sostenibilidad y creciente eficiencia del sistema eléctrico mundial.

En el caso de los transformadores eléctricos, los esfuerzos se han basado en buena medida en el mejoramiento de la calidad de los materiales. Ése es el caso del circuito magnético, donde se ha desarrollado con éxito una aleación de hierro, boro y silicio (denominado “metal amorfo” por sus características físico-químicas), cuyas propiedades excepcionales permiten reducir ostensiblemente las pérdidas magnéticas del transformador, en comparación al acero al silicio de grano orientado (el más utilizado en la actualidad por los fabricantes de transformadores).

En el Capítulo 2 del presente documento de memoria se repasan los fundamentos teóricos del transformador eléctrico, su relación con los sistemas de distribución, detallando algunos aspectos teóricos y constructivos interesantes de éste. Luego, se chequean con mayor detalle conceptos asociados al circuito magnético del transformador: fundamentos teóricos, propiedades magnéticas y pérdidas, principalmente.

Posteriormente se describe con detalle las propiedades y características del metal amorfo, donde se incursiona en una revisión exhaustiva, que considera su origen, evolución, composición química, atributos y características especiales, proceso de fabricación, entre otros. Con esto se logra comprender

las ventajas y desventajas que ofrecen los metales amorfos con respecto a los aceros tradicionales, bajo el prisma de comparación entre dos materiales distintos.

En el Capítulo 3 se ahonda específicamente en la aleación amorfa, indicando algunas exigencias que éste debe tener para poder ser utilizado como núcleo de transformadores eléctricos. Las propiedades del metal amorfo entregan indicios claros para la formulación de conceptos de diseño del transformador final; se postulan en esta sección algunos de los diseños factibles y se analizan según las características de cada caso. Este proceso concluye con la elección de una de las configuraciones, la cual es aplicada en un programa de cálculo de parte activa (válido para transformadores de distribución monofásicos), que servirá para simular y comparar diseños con acero amorfo y acero al silicio convencional. El detalle del software de cómputo se centra en la revisión de los parámetros asociados al núcleo del transformador.

En el Capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos tras la aplicación del software a dos casos posibles de simulación, para uno y otro tipo de acero. En esta sección se detallan las características de dichas pruebas, analizando los valores obtenidos con respecto a características técnicas y posteriormente económicas, chequeando si cumplen con la normativa asociada. En el caso del análisis económico, éste se realiza mediante una herramienta típica de evaluación de transformadores, el TOC (Costo Total del Propietario).

Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones generales del documento, consideradas a partir de la extensa investigación realizada en la literatura, así como de los resultados obtenidos a partir de la implementación y aplicación del programa de cálculo de parte activa. Se exhibe además comentarios personales del autor en cuanto a desarrollos adicionales que pudiesen realizarse al presente documento.

CAPÍTULO 2

DESARROLLO Y CARACTERÍSTICAS DE LA ALEACIÓN AMORFA EN EL MERCADO DE LA DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA

Los altos costos de energía, en conjunto con regulaciones medioambientales cada vez más estrictas y la disminución progresiva de las reservas de energía a nivel mundial, han forzado a las corporaciones y empresas industriales a desarrollar programas de conservación de energía.

Estimaciones hechas en el año 1996 predecían que la demanda por energía primaria crecería hacia el 2010 a una tasa anual de 2,1%, lo que implica un aumento en los niveles de consumo de este bien de 48% con respecto al año 1991. [1]

Más de la mitad de la electricidad consumida en Estados Unidos es producida por plantas generadoras que utilizan carbón como fuente principal de combustible primario. Lo anterior implica al menos un aumento de 50% en las emisiones de dióxido de carbono hacia el año 2010.

La siguiente tabla muestra una estimación de las tasas de emisión de elementos contaminantes para varias fuentes de energía (circa 1992):

Energy Source	Elec. Gen. Billion kWh	Percent of total Energy	Avg. SO ₂ Emission Lb/MWH	Avg. NO _x Emission Lb/MWH	Avg. CO ₂ Emission Lb/MWH	Avg. SO ₂ Emission Lb/MM BTU	AVG. NO _x Emission Lb/MM BTU	Avg. CO ₂ Emission Lb/MM BTU
Coal	1576	56.3	18.3	9.0	2063	1.78	0.88	201
Natural Gas	264	9.4	0.0	4.6	1206	0.0	0.42	113
Petroleum	89	3.2	11.9	3.8	1569	1.12	0.35	147
Nuclear	619	22.1						
Hydro	240	8.6						
Geothermal	10	0.4						

Tabla 2.1: Tasa de emisión de contaminantes según fuentes de energía.

Agencias establecidas y reconocidas internacionalmente como la NSPS (New Source Performance Standards) han establecido ciertos límites generales a la industria con respecto a la emisión de dióxido de azufre (SO₂) y óxido de nitrógeno (NO_x). Éstos son de 0,2 Lb/MM BTU para el caso de NO_x, y 0,8 Lb/MM BTU para SO₂. Las sanciones y costos asociados pueden llegar a ser sumamente altos si es que estos límites son sobrepasados.

Es producto de lo anterior que las empresas han empezado a mostrar preocupación sobre el tema, iniciando un desarrollo sostenido de nuevas técnicas que buscan, mediante la implementación de estos programas de conservación energética, disminuir sus niveles de emisión de contaminantes, en conjunto con algunos ahorros en cuanto a costos, y eventualmente prevenir pérdidas económicas minimizando la probabilidad de falta de suministro de materias primas (fuente de combustible principalmente).

Uno de los principales desafíos de la industria es materializar este propósito, pavimentando un camino constante de evolución y mejora continua. En los sistemas de distribución eléctrica uno de los elementos más propensos a este proceso de perfeccionamiento son los transformadores eléctricos.

Lo anterior debiese ser evaluado bajo el prisma de dos aristas bien definidas: la primera, el aspecto técnico, donde se debe garantizar que el elemento cumplirá con estándares mínimos de calidad, en cuanto a funcionamiento, eficiencia, productividad, seguridad, etc.; y la segunda, el aspecto económico, ya que como los transformadores son máquinas que pueden operar por varios años, se deben considerar adecuadamente los costos del ciclo de vida durante el proceso de inversión inicial para evaluar los ahorros de energía.

Transformadores Eléctricos en la Industria

El contexto general del presente tema de memoria hace referencia básicamente al sistema de distribución eléctrica. En los sistemas de suministro eléctrico de corriente alterna, el transformador es un componente indispensable.

La electricidad generada sufre una infinidad de transformaciones; por ejemplo, la tensión aumenta para su transmisión a través de largas distancias y en varios niveles de magnitud, pero disminuye cuando llega al usuario final (para uso industrial, comercial o doméstico).

El proceso básicamente es como sigue: después de ser generada en estaciones de poder, la energía eléctrica necesita ser transportada a las áreas donde será consumida. El transporte es más eficiente a altas tensiones, lo que explica que las energías generadas (normalmente del orden de 10 a 30 kV) sean convertidas a otras típicas de entre 200 y 400 kV, o mayores. Dado que la mayoría de las aplicaciones e

instalaciones eléctricas operan a bajos voltajes, es fundamental reconvertir estas tensiones a otras similares a las de la generación. Las principales razones para disminuir la tensión es incrementar el grado de seguridad para el usuario final y por las características de aislamiento de los equipos involucrados.

De esta manera, la energía eléctrica pasa por un promedio de al menos cuatro transformaciones durante su recorrido antes de ser consumida o utilizada. Un gran número de transformadores de diferentes clases y tamaños son necesarios en las redes de transmisión y distribución, con un rango amplísimo de tensiones de operación. En general, los transformadores de mayor tamaño se utilizan para altos voltajes (llamados consecuentemente transformadores de poder), mientras que el último paso de transformación para las principales tensiones de consumo ($< 500 \text{ V}$ normalmente) es realizada por el transformador de distribución.

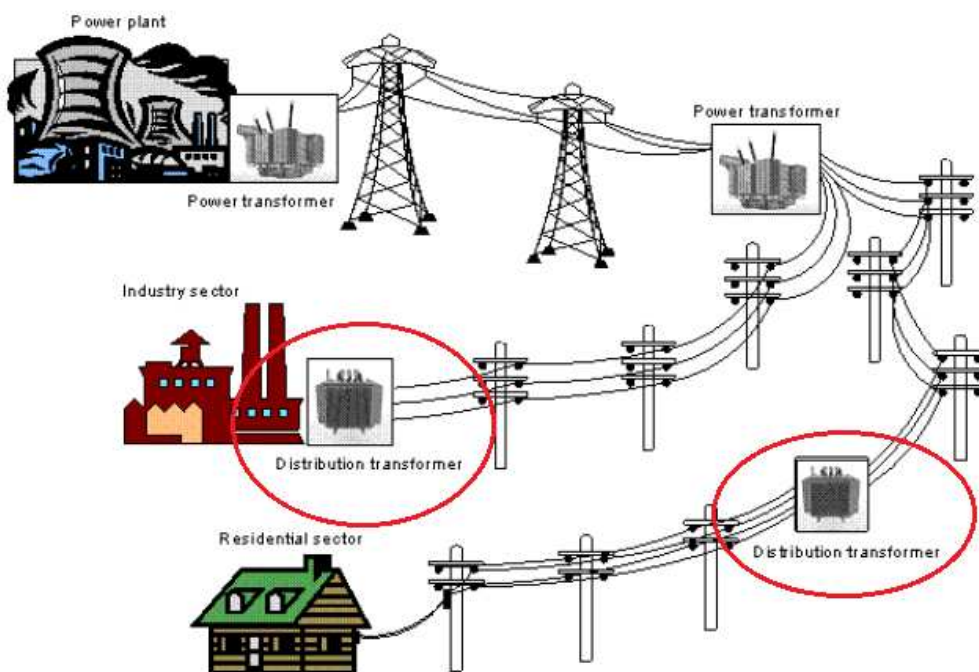


Figura 2.1: Sistema elemental de generación, transmisión, distribución y consumo eléctrico.

La energía eléctrica total consumida anualmente en la Unión Europea es cercana a los 2777.1 TWh ($1\text{TWh}=10^9 \text{ kWh}$). Estudios [2] han estimado que las pérdidas en todos los sistemas de distribución europeo son de 200 TWh, o 7.2% del total de energía eléctrica consumida. Entre el 30 y 35% de dichas

pérdidas son generadas por los transformadores en los sistemas de distribución, lo que se traduce en 60 a 70 TWh desperdiciados (y consecuentemente, entre un 2,4 y 2,8% del total de energía eléctrica consumida).

Los sistemas de distribución modernos tienen una eficiencia típica del 98 – 99% a media carga. Esto podría sugerir a priori un pequeño potencial de mejora con respecto al desempeño medioambiental de los transformadores; sin embargo, debido a la gran cantidad de transformadores de distribución existentes y operativos, el impacto total de pequeñas mejoras podría reflejar una contribución enorme en la reducción de efectos en el medio ambiente, como lo son el calentamiento global y el cambio climático.

Conceptos básicos de un transformador

La norma IEC define al transformador como una máquina estática con dos o más enrollados, que por inducción electromagnética transforma un sistema de tensión y corriente alterna en otro sistema de tensión y corriente alterna, de la misma frecuencia, generalmente de distintos valores, con el fin de transmitir la potencia eléctrica. [3]

Un transformador se compone esencialmente de dos elementos: el núcleo ferromagnético y los devanados o enrollados. El transformador utiliza las propiedades magnéticas del núcleo y la corriente en el enrollado primario (conectado a una fuente de tensión alterna) para inducir una corriente en el secundario (conectado a una carga o salida).

La corriente alterna en el enrollado primario induce un flujo magnético en el núcleo, el que a su vez induce un voltaje en el secundario. El flujo generado en el primario tiene una magnitud que depende del voltaje aplicado y del número de vueltas del enrollado; mientras que la tensión inducida en el secundario tiene una magnitud dependiente del número de vueltas del secundario.

De esta manera, la energía eléctrica se transferirá desde el circuito primario, a través del transformador, hacia la carga. En un transformador ideal (esto es, un equipo sin ningún tipo de pérdidas y permeabilidad magnética infinita) el voltaje inducido en el secundario V_S está en proporción con el

voltaje en el primario V_P y está vinculado a la razón del número de vueltas en el enrollado secundario N_S y el número de vueltas del enrollado primario N_P :

$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P} \quad (2.1)$$

En las siguientes secciones se presentará de manera breve y concisa algunas características fundamentales de los transformadores eléctricos; en particular, sus detalles constructivos, técnicos y económicos, para concluir con una descripción de nuevas tecnologías.

Aspectos Constructivos de un Transformador

La construcción de un transformador de potencia (Figura 2.2) comprende fundamentalmente el núcleo y los enrollados. Dentro de la industria de los transformadores, el conjunto de ambos componentes recién citados constituyen la “Parte Activa” del transformador. Mientras tanto, la parte pasiva la componen otros elementos, como por ejemplo el estanque, el líquido aislante (sistema de enfriamiento), aislaciones, ferreterías, instrumentos y otros accesorios menores.



Figura 2.2: Vista en corte de un transformador de distribución.

Núcleo

El núcleo es el elemento responsable de confinar el flujo magnético a un circuito bien definido, de alta permeabilidad magnética, permitiendo el efecto de transformación entre el devanado primario y secundario. Este efecto puede conseguirse mediante un núcleo de aire, sin embargo se obtendrá un resultado mucho más satisfactorio con un núcleo de hierro (u otro material ferromagnético).

Las construcciones típicas de estos circuitos magnéticos se realizan apilando varias láminas delgadas (normalmente de acero con un pequeño porcentaje de silicio), aisladas unas de otras por un barniz adecuado. Las formas que tienen los núcleos son sumamente variables según la aplicación; no obstante, se pueden establecer dos tipos principales: “Tipo Núcleo” y “Tipo Acorazado”.

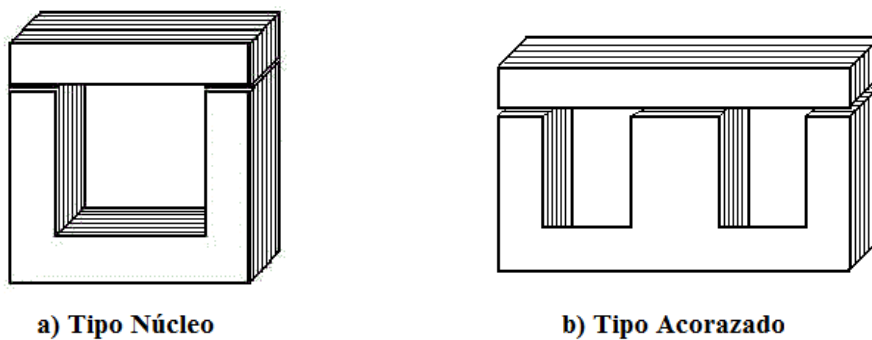


Figura 2.3: Principales tipos de núcleo en transformadores eléctricos.

En el “tipo núcleo” (Figura 2.3 – (a)), las bobinas se encuentran enrolladas en torno a dos piernas de un núcleo magnético de forma rectangular. Este núcleo no es macizo, sino que se encuentra formado por un paquete de chapas superpuestas, aisladas eléctricamente entre sí. Nótese que esta construcción se realiza con un paquete de láminas en forma de “U” y un paquete superior en forma de “I”, donde las láminas se colocan alternadas y sucesivas, de modo de evitar pérdidas por reluctancia.

En el “tipo acorazado” (Figura 2.3 – (b)), las bobinas se enrollan en torno a la pierna central de un núcleo conformado por tres piernas. En este caso, el armado del núcleo se realiza con paquetes de láminas en forma de “E” y un paquete superior en forma de “I”, colocándose en forma alternada para evitar que las juntas coincidan.

En general, debido a los procesos de construcción de los transformadores, es necesario que el circuito magnético se encuentre abierto (para el montaje de las bobinas particularmente), por lo que no se pueden utilizar láminas o piernas de una sola pieza. Para ello, los fabricantes se deben cerciorar de que no coincidan las uniones de dos láminas vecinas, ya que se pueden producir cortocircuitos entre láminas, que aumentarían las pérdidas de Foucault. Esto explica la disposición de láminas vecinas alternadas.

Bobinas

El material conductor utilizado para los enrollados dependerá del tipo de aplicación, pero en cualquier caso las vueltas individuales de éste deben estar eléctricamente aisladas unas de otras.

En el caso de los transformadores de distribución, los devanados suelen fabricarse de cobre o aluminio, debidamente aislado con papel u otro material similar.

Las formas del bobinado dependerán fuertemente del diseño impuesto en el núcleo. En el caso de los transformadores tipo núcleo cada enrollado estará compuesto de dos secciones, colocadas una en cada pierna; los enrollados primario y secundario forman bobinas concéntricas. En los tipos acorazados puede usarse variantes del tipo concéntrico, o bien los enrollados pueden estar constituidos por bobinas delgadas (panquecas) colocadas una encima de otra e intercalando bobinas primarias con secundarias.

En general, para transformadores de distribución, se bobina el devanado secundario (baja tensión) sobre la pierna del núcleo, y sobre ésta el devanado primario (alta tensión). A su vez, los conductores se bobinan sobre un cilindro base en forma de capas; esto es, una técnica de enrollado helicoidal, donde el conductor es bobinado en forma continua al largo deseado, en forma de hélice. La compensación del grado de inclinación en los extremos, se realiza por medio de piezas aislantes preformadas de presspan (o derivado del papel).

Sistema de Refrigeración

Las altas temperaturas de los equipos en operación tienen efectos dañinos, especialmente en el largo plazo. Es por ello que el transformador debe poseer algún tipo de refrigeración.

En general la refrigeración en transformadores de distribución se logra mediante convección natural del líquido aislante al interior del estanque, y por disipación de calor mediante radiadores. A medida que la

potencia va aumentando, se hace necesario un enfriamiento con otros mecanismos; entre los más comunes se encuentra la ventilación forzada de aire (ventiladores), enfriamiento mediante agua (bombas de agua) o combinaciones de los anteriores.

En el caso de transformadores secos, debido a la naturaleza de sus materiales aislantes, no es necesario ningún tipo de líquido refrigerante, siendo el aire el elemento de enfriamiento por omisión.

Aspectos Técnicos de un Transformador

Si el enrollado secundario está conectado a una carga que permite el flujo de corriente, se transmite una potencia eléctrica desde el circuito primario hacia el secundario. En el caso de un transformador ideal, toda la energía de entrada (primario) pasa por la etapa de transformación sin experimentar ningún tipo de pérdidas, igualándose por tanto a la energía que recibe la carga a la salida.

Matemáticamente lo anterior se traduce como sigue:

$$P_{ENTRADA} = V_P \cdot I_P = P_{SALIDA} = V_S \cdot I_S \quad (2.2)$$

Relacionando entonces la ecuación (1.1) con (1.2), se obtiene la ecuación típica de un transformador ideal:

$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P} = \frac{I_P}{I_S} \quad (2.3)$$

Estas relaciones son muy importantes, pues establecen el factor de eficiencia de un transformador. De hecho, la fórmula (2.3) es una aproximación más que razonable para la mayoría de los transformadores fabricados y operativos hoy en día.

Por lo tanto, un transformador con las características recientemente descritas no tendría pérdidas de energía y sería 100% eficiente. En la práctica, estos equipos disipan energía en los devanados, núcleo y estructuras aledañas a la parte activa. Los transformadores de poder son generalmente más eficientes, y aquellos destinados a distribución eléctrica usualmente operan con eficiencias superiores al 98%. [4]

Eficiencia de un Transformador

El rendimiento o eficiencia η se define como la razón entre potencia útil (P_U) y la potencia total de entrada (P_T). Dado que el transformador es una máquina estática, un porcentaje mayoritario de la energía que recibe “fluye” casi en su totalidad hacia la carga (P_U), mientras que la fracción menor se pierde en los elementos constituyentes del equipo (P_P).

De lo anterior se establece entonces que:

$$\eta = \frac{P_U}{P_T} \cdot 100 \quad (2.4)$$

$$P_T = P_U + P_P \quad (2.5)$$

Las pérdidas en los transformadores (con exclusión de los circuitos asociados) varían con la carga real, y pueden ser expresados como “Pérdidas en vacío” (P_0) o “Pérdidas en carga” (P_{CU}). Las pérdidas en carga están determinadas principalmente por la resistencia de los enrollados, mientras que las pérdidas en vacío se deben en un 99% a las pérdidas por histéresis y por corrientes de Foucault.

Las pérdidas en vacío pueden ser significativas, ya que incluso un transformador sin actividad constituye una carga para el suministro eléctrico y un costo de funcionamiento asociado.

La potencia útil P_U puede expresarse como $V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi$; asimismo, la potencia perdida P_P corresponde a las pérdidas en el cobre P_{CU} ($R \cdot I_2^2$) y las pérdidas en el fierro P_0 . Las primeras serán esencialmente variables con la carga, mientras que las pérdidas en el fierro serán constantes para un voltaje primario constante. [5]

Aplicando lo anterior a la ecuación (2.4):

$$\eta = \frac{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi}{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi + R \cdot I_2^2 + P_0} \cdot 100 \quad (2.6)$$

De la ecuación anterior se desprende que la condición de máximo rendimiento se alcanza al derivar η con respecto a I_2 :

$$\frac{d}{dI_2} \left(V_2 \cdot \cos \varphi + R \cdot I_2 + \frac{P_0}{I_2} \right) = 0 \Leftrightarrow R \cdot I_2^2 = P_0 \quad (2.7)$$

Por lo tanto, la máxima eficiencia se produce cuando se igualan las pérdidas en vacío con las pérdidas en carga.

Aspectos Económicos de un Transformador

El mercado de los transformadores de distribución es uno de los más interesantes y explotados en los últimos años. En particular se ha observado un aumento progresivo, tanto en la cantidad de equipos instalados así como en el crecimiento de las ventas. Así lo indican variados estudios especializados en este sector de la industria eléctrica.

La siguiente tabla muestra información específica sobre la cantidad de transformadores instalados (en servicio) en una fracción importante de la Unión Europea [6]:

<i>EU-25 region</i>	<i>Stock</i>				
	<i>Distribution oil</i>	<i>Industry oil</i>	<i>Industry dry</i>	<i>Power oil</i>	<i>DER dry</i>
EAST	148100	42100	4250	65000	20000
MID	2366800	368600	101590		
NORTH	300000	35800	38960		
SOUTH	794400	334500	24680		
Total	3609300	781000	169480		

Tabla 2.2: Resumen de cantidad de transformadores en servicio en la Unión Europea (2005)

Donde: *EAST: República Checa, Hungría, Eslovaquia, Eslovenia.*

MID: Austria, Bélgica, Alemania, Francia, Irlanda, Luxemburgo, Holanda, Polonia y Gran Bretaña.

NORTH: Dinamarca, Estonia, Finlandia, Lituania y Suecia.

SOUTH: Chipre, Grecia, Italia, Malta, Portugal y España.

Se desprende de la tabla anterior que, para el universo de transformadores eléctricos en servicio, los transformadores de distribución inmersos en aceite representan del orden del 77,7% del total.

Otro de los puntos importantes a considerar en términos económicos es la eficiencia del transformador. Los niveles de pérdidas de los equipos son la mejor herramienta para realizar esta evaluación.

La siguiente tabla muestra la potencia nominal promedio para cada sector, con las correspondientes pérdidas en vacío (promedio) y pérdidas en carga (promedio) en la Unión Europea [6]:

Sector		<i>Average Rated Power (S in kVA)</i>	<i>Average no-load loss (Po in W)</i>	<i>Average load loss (Pk in W)</i>
<i>Distribution oil</i>	stock	250	650	3250
	sales	400	750	4600
<i>Industry oil</i>	stock	630	1300	6500
	sales	1000	1700	10500
<i>Industry dry</i>	stock	800	2500	10000
	sales	1250	2800	13100
Power	Stock (1990)	100000	80000	300000
	Sales (2005)	100000	40500	326000
DER	stock	2000	3100	21000
	sales	2000	1760	16800

Tabla 2.3: Potencia y pérdidas promedio según los distintos sectores del mercado de transformadores en la Unión Europea (2009).

Notar que la tabla anterior contiene información sobre cantidad de equipos ya vendidos y transados (“sales”), así como transformadores de disponibilidad inmediata para el cliente final (“stock”).

Finalmente, se presenta un gráfico con información global sobre transformadores de distribución de baja y media tensión, para la misma zona de la Unión Europea descrita en Tabla 2.2. [6]

Las observaciones generales son las siguientes:

- La eficiencia energética promedio es del 98,38%.
- No todos los países tienen la misma aproximación a la eficiencia energética y/o a las pérdidas con carga; sin embargo, esto se puede relacionar a los distintos perfiles de carga de los transformadores y los precios de la electricidad particular para cada país.

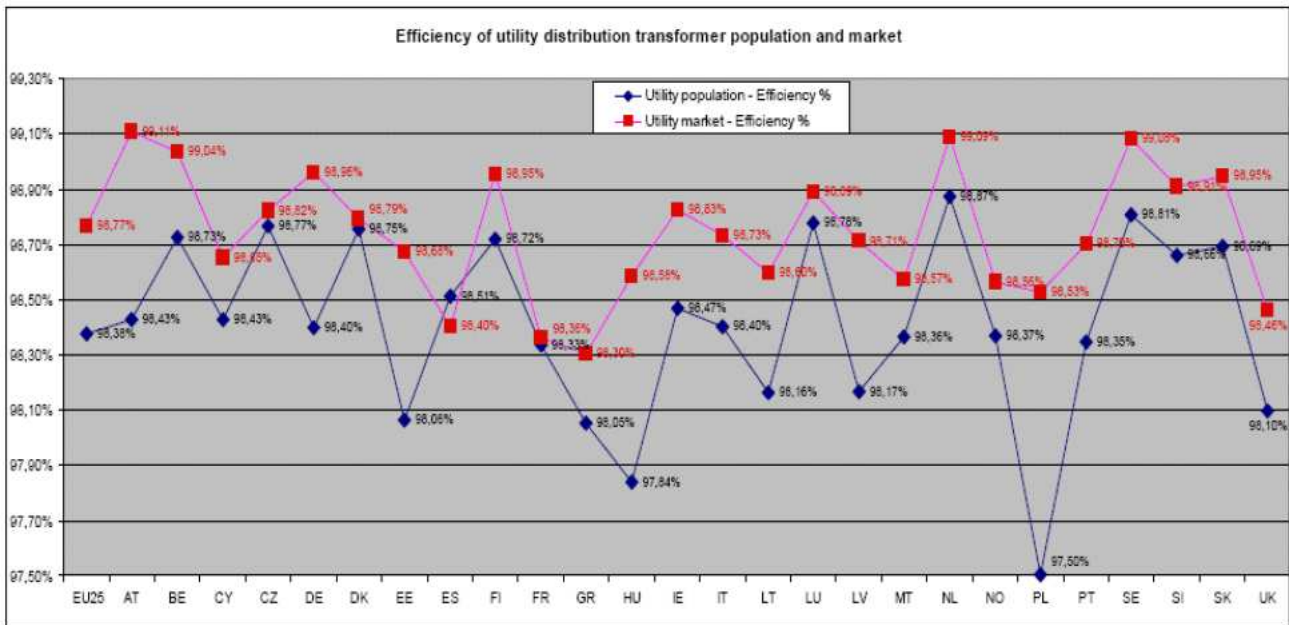


Figura 2.4: Eficiencia energética de transformadores de distribución en la Unión Europea (stock y mercado).

El consumo total de electricidad en el sector residencial en la Unión Europea ha crecido durante años recientes a casi la misma velocidad que la economía.

Sin embargo, se espera que el consumo eléctrico disminuya en los próximos 10 – 15 años. De hecho, las políticas gubernamentales y programas sobre eficiencia energética han incentivado la sustitución de equipos menos eficientes por otros con nuevas tecnologías. Se estima que el stock completo de transformadores menos eficientes será reemplazado en a lo más 15 años, y los efectos de estas políticas estarán plenamente afianzados y reconocidos por la sociedad. Esto conllevará, evidentemente, ahorros en lo económico y también en el cuidado del medioambiente.

Nuevas Tecnologías

La producción de electricidad distribuida aumentará en el transcurso de los años siguientes. La producción de transformadores “in situ” minimizará las pérdidas de potencia y distribución, así como los

gastos relacionados, que son actualmente una parte significativa (>30%) del costo total de la electricidad.

Enmarcado en esta meta, la industria de los transformadores (en particular aquellos de distribución) tienen varios nichos de desarrollo sumamente interesantes.

En términos teóricos no hay muchas posibilidades “nuevas” en el sentido estricto de la palabra; los transformadores han sido muy estudiados a lo largo de los años, y su concepción básica sigue siendo la misma. Es por ello que las principales mejoras van ligadas al perfeccionamiento de los elementos constituyentes de los mismos; por ejemplo, mejorar la calidad de los materiales, o la introducción de nuevos elementos que posean alguna característica especial con respecto a lo existente (en términos técnicos y/o económicos).

Por ejemplo, normalmente se considera fundamental en las máquinas eléctricas a los conductores, pero las principales mejoras en su rendimiento se han debido, esencialmente, al mejoramiento de la calidad de las chapas magnéticas, la implementación de láminas con acero de mejores características; y en menor medida, a progresos en los materiales aislantes y refrigerantes.

Dentro de las nuevas tecnologías se pueden enunciar las siguientes como las más importantes, obviando el ya mencionado perfeccionamiento de los materiales existentes:

- Superconductores

Se entiende por superconductividad a la capacidad intrínseca que poseen ciertos materiales para conducir corriente eléctrica sin resistencia ni pérdida de energía en determinadas condiciones. A diferencia de los conductores estándar de cobre o aluminio, los superconductores tienen una resistencia prácticamente nula, y desciende a cero cuando el material se enfría por debajo de su temperatura crítica. Posee una alta eficiencia, pues posee pérdidas variables bajas. Lo anterior se subentiende ya que, citando ecuación (2.6), las pérdidas de Joule son proporcionales a $R \cdot I_2^2$, por lo que al acercarse R a cero, también lo harán las pérdidas asociadas a ese parámetro.

Otras ventajas importantes la constituyen su baja impedancia de cortocircuito, y dada su gran densidad de corriente, permite un flujo de corriente mayor a lo convencional con menor cantidad de material (consecuentemente, involucra una disminución de peso y volumen de hasta un 40%). [7]

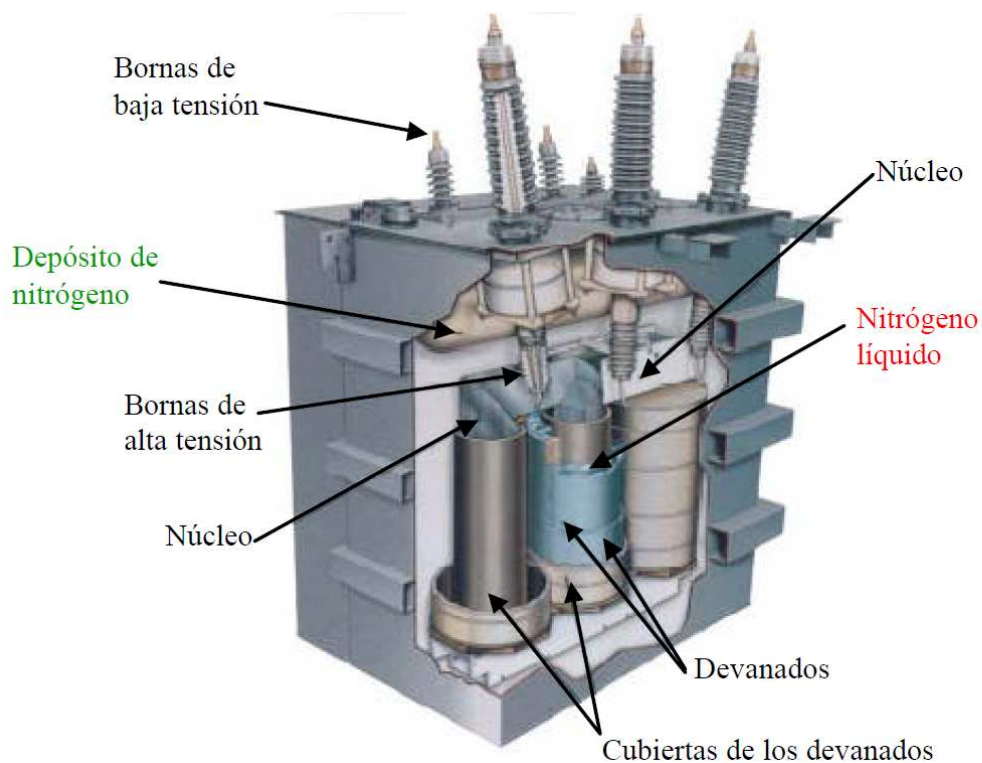


Figura 2.5: Vista en corte de un transformador superconductor de altas temperaturas.

Las principales desventajas de esta tecnología son la pérdida de superconductividad en algunas condiciones (campos magnéticos intensos, corrientes elevadas, temperaturas extremadamente altas, etc.), y presenta resistencia nula solamente en corriente continua. Además, su implementación obliga el uso de una cámara de nitrógeno, la cual obviamente es mucho más cara que otros refrigerantes habituales.

- Núcleos de Metal Amorfo

Las aleaciones metálicas amorfas son metales con un rango de orden atómico corto, obtenidas a partir de un enfriamiento rápido de la aleación fundida. Su naturaleza comprende un comportamiento magnético sumamente particular, con pérdidas magnéticas menores que cualquier otra aleación cristalina. Además, poseen gran dureza y una resistencia a la tracción extremadamente alta, resistividad eléctrica tres o cuatro veces mayor que las aleaciones convencionales de hierro, y alta resistencia a la corrosión.

Su aplicación en transformadores es primordial pues se estima que reducen las pérdidas en vacío en torno al 60 – 70% comparado con el acero al silicio tradicional.



Figura 2.6: Núcleo de metal amorfo.

Fundamentos Teóricos de Núcleos en Transformadores Eléctricos

En general, en las máquinas eléctricas se utiliza una gran variedad de materiales magnéticos, en cuanto a tipos y formas, que van desde chapas finas estampadas (de acero al silicio) hasta piezas macizas de hierro para rotores de alternadores síncronos y para las piezas polares de las máquinas de corriente continua. Todos los materiales ferromagnéticos utilizados en las máquinas eléctricas se caracterizan por poseer una elevada permeabilidad relativa y una relación no lineal entre inducción magnética y la intensidad de campo magnético.

Las características del material no pueden definirse simplemente por medio de pocas constantes numéricas, sino que es preciso valerse de familias de curvas que relacionen ciertas variables con otras, tales como el espesor y la frecuencia, tomadas como parámetros.

Conceptos Teóricos de un Núcleo Magnético

El campo magnético, como concepto, es el mecanismo fundamental para convertir energía, tanto en alterna como en continua. En el caso de los transformadores, un campo magnético variable con el tiempo induce un voltaje en una bobina de alambre si pasa a través de ésta.

Si se tiene un caso como el indicado en la figura 2.7 (núcleo rectangular con un devanado de N vueltas de alambre enrollado sobre una de las ramas del núcleo), donde el material de construcción de dicho núcleo es algún elemento ferromagnético, casi todo el campo magnético producido por la corriente “ i ” permanecerá dentro del núcleo; esto es, por la longitud del conductor enrollado.

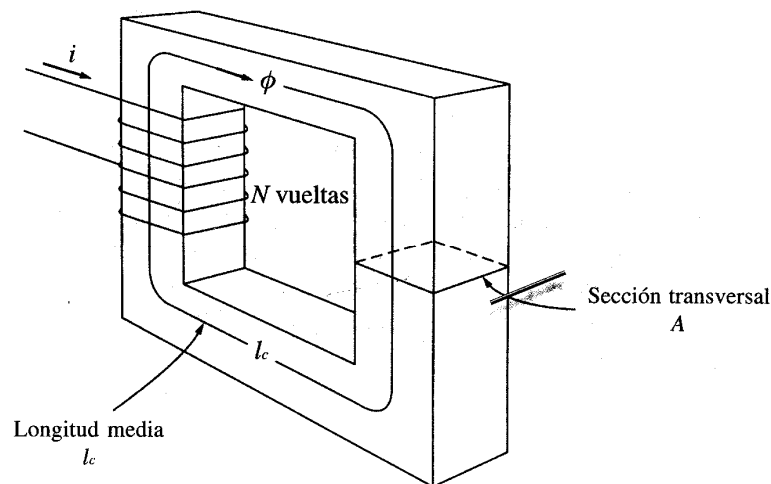


Figura 2.7: Esquema de funcionamiento básico de un transformador.

Aplicando la ley de Ampere a la situación planteada en la Figura 2.7, se obtiene la siguiente relación (ecuación 2.9):

$$\text{Ley de Ampere: } \int H \cdot dI = I_{NET} \quad (2.8)$$

$$H = \frac{N \cdot i}{l_c} \quad (2.9)$$

Donde: H: magnitud del vector de intensidad de campo magnético.

N: número de vueltas de alambre enrollado sobre el núcleo.

i: corriente que fluye por el enrollado primario.

l_c : longitud media del núcleo.

La intensidad de campo magnético es, de alguna manera, una medida del “esfuerzo” de una corriente por establecer un campo magnético. La potencia del campo magnético producido en el núcleo depende también del material de éste. La relación entre la intensidad de campo magnético “H” y la densidad de flujo magnético resultante “B” producida dentro del material está dada por:

$$B = \mu \cdot H \quad (2.10)$$

Reemplazando ecuación (2.10) en (2.9):

$$B = \mu \cdot H = \mu \cdot \frac{N \cdot i}{l_c} \quad (2.11)$$

El flujo total en cierta área está determinado por:

$$\phi = \int_A B \cdot dA \quad (2.12)$$

Si el vector de densidad de flujo es perpendicular a un plano de área A (A: área de la sección transversal del núcleo) y si la densidad de flujo es constante en toda el área, reemplazando (2.11) en (2.12) se obtiene:

$$\phi = B \cdot A = \frac{\mu \cdot N \cdot i \cdot A}{l_c} \quad (2.13)$$

Propiedades Magnéticas

Los materiales ferromagnéticos se caracterizan por uno o varios de los siguientes atributos:

- Pueden imantarse mucho más fácilmente que los demás materiales. Esta característica es indicada por una gran permeabilidad magnética relativa μ_r . Matemáticamente μ_r corresponde a la permeabilidad de cualquier material (μ) comparada con la permeabilidad del espacio libre (μ_0):

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.14)$$

- Tienen una inducción magnética intrínseca muy elevada.
- Se imantan con una facilidad muy diferente según sea el valor del campo magnético. Este atributo lleva a una relación no lineal entre la inducción magnética y la intensidad de campo magnético.
- Un aumento del campo magnético les origina una variación del flujo diferente de la variación que originaría una disminución igual de campo magnético. Esto indica que las relaciones que expresan la inducción magnética y la permeabilidad como funciones del campo magnético no son lineales ni uniformes.
- Conservan la imantación al suprimir el campo magnético.
- Tienden a oponerse a la inversión del sentido de imantación una vez que están imantados.

Ciclo de Histéresis

Es el ciclo característico que se obtiene del proceso de magnetizar y desmagnetizar cíclicamente un material ferromagnético. La curva de histéresis (B-H) muestra la relación instantánea entre la densidad de flujo B y la intensidad magnética H a lo largo de un ciclo completo. Un material dado puede tener distintas curvas (B-H) para cada valor distinto de la densidad de flujo máximo en los extremos del lazo. La siguiente figura representa un ciclo de histéresis típico:

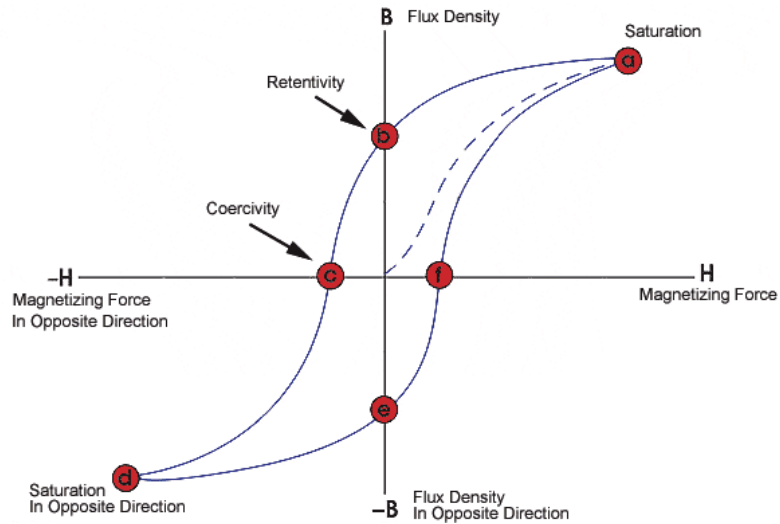


Figura 2.8: Ciclo de Histéresis típico.

Pérdidas Magnéticas

La pérdida total de energía, ocasionada al ser atravesado el núcleo de la máquina eléctrica por el flujo creado por un campo magnético de valor alterno en la unidad de tiempo, se llama “pérdida magnética total”.

Las pérdidas totales de las chapas magnéticas equivalen a la suma de las pérdidas por histéresis y las pérdidas por corrientes de Foucault. Estas pérdidas totales de las chapas de los materiales ferromagnéticos típicamente utilizados en transformadores eléctricos, son casi siempre la característica más importante que interesa conocer en el material a emplearse; especialmente para la evaluación técnica y económica de un núcleo.

Empíricamente estas pérdidas se obtienen como sigue:

$$P_t = P_h + P_f \quad (2.15)$$

Donde:

- P_t = pérdidas magnéticas totales
- P_h = pérdidas por histéresis
- P_f = pérdidas por corrientes de Foucault

A continuación se reseñará brevemente las características de cada una de las componentes de las pérdidas magnéticas totales.

- Pérdidas por histéresis

Las pérdidas por histéresis representan a la energía absorbida por un material cuando, bajo la influencia de un campo magnético variable, sufre un ciclo de imantación y desimantación completo. Estas pérdidas se expresan en Watts/kg.

La pérdida total por histéresis en un volumen “V” de material, en el que la inducción magnética sea uniforme en todos sus puntos y varíe cíclicamente con una frecuencia “f”, puede expresarse empíricamente por:

$$P_h = k_1 \cdot V \cdot f \cdot B_{max}^n \quad (2.16)$$

Donde:

k_1 = constante del material

V = volumen del material

f = frecuencia

B_m = inducción magnética máxima

n = coeficiente variable

El valor del coeficiente “n”, si bien es cierto que es variable, puede fijarse normalmente entre los valores 1,6 y 1,71 aproximadamente (según experiencias realizadas por C.P. Steinmetz); aunque con los últimos avances en la calidad de los aceros, este exponente puede llegar hasta 2,5 o incluso más. [5]

- Pérdidas por corrientes de Foucault (corrientes parásitas)

Las corrientes de Foucault son corrientes que circulan en el interior de los materiales ferromagnéticos de forma perpendicular a la dirección del flujo magnético, como resultado de fuerzas electromotrices inducidas en los mismos, debiéndose ellas al efecto de las variaciones de flujo que experimentan cuando están sometidas a la acción de campos magnéticos de intensidad variable.

La fuerza electromotriz “e” inducida a lo largo de un circuito magnético cerrado (un núcleo, por ejemplo) está dado por:

$$e = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.17)$$

Esta fuerza electromotriz hace que por el circuito magnético (material del núcleo) circule una corriente de intensidad “i”, la cual genera a su vez una fuerza magnetomotriz tal que se opone al sentido de la variación del flujo “Φ”. Su presencia origina una pérdida de energía en el material, proporcional a “R · I₂²”, llamada “pérdida por corriente de Foucault” (P_f), absorbiéndose dicha energía desde el circuito que crea el campo (enrollado de N vueltas) y disipándose en forma de calor en el medio.

Empíricamente se expresa de la siguiente manera:

$$P_f = k_2 \cdot \frac{f^2 \cdot B_{max}^2 \cdot t^2}{P} \quad (2.18)$$

Donde:

k₂ = constante del material

f = frecuencia

B_m = inducción magnética máxima

t = espesor de las chapas que componen el núcleo

P = coeficiente de resistividad del material

Finalmente entonces, si se somete a una muestra del material de chapas de aleación a la acción de un campo magnético de intensidad y sentido variables, con una frecuencia conocida, entonces las pérdidas magnéticas totales serán función directa de las constantes del material, la constante “n”, el espesor de las chapas y el coeficiente de resistividad del material:

$$P_t = f(k_1; k_2; n; t; P) \quad (2.19)$$

Tal como se ha mencionado en secciones anteriores, los núcleos de los transformadores eléctricos suelen ser de acero con un pequeño porcentaje de silicio. En general este material se ha utilizado con frecuencia desde principios del siglo XX hasta nuestros días, con resultados ampliamente comprobados y exitosos. Durante los años siguientes, las mejoras de las propiedades de las chapas magnéticas se consiguieron por cambios en la composición química; mientras que en épocas más recientes los avances más significativos se han conseguido por mejoras en los procesos de fabricación, realizándose trabajos en el control del tamaño del grano y orientación de los cristales, obteniendo los llamados “Aceros al silicio de alta inducción” (Hi-B).

Sin embargo, a partir de 1980 aproximadamente se han desarrollado novedosas técnicas, tales como aceros irradiados por láser y el desarrollo de metales amorfos que permiten obtener chapas magnéticas de bajísimas pérdidas, nunca antes alcanzadas por ningún tipo de material ferromagnético.

En las siguientes secciones se profundizará el estudio de las aleaciones amorfas, y su inclusión y desarrollo en transformadores eléctricos de distribución.

Propiedades y Características del Metal Amorfo

La necesidad de reducir las pérdidas magnéticas del transformador, a través del uso de materiales para núcleo magnético más eficientes, ha sido desarrollado e implementado principalmente por empresas que han reconocido el valor de los costos incrementado por las pérdidas del sistema eléctrico. La ciencia y la tecnología de las aleaciones amorfas han evolucionado desde ser una curiosidad de laboratorio hasta ser un material útil como núcleo de transformador con bajas pérdidas, comercialmente disponible. La aleación amorfa compuesta de hierro, boro y silicio, se adecúa bien para ser empleada como núcleo de transformadores. En particular, la aleación comercial Metglas 2605SA-1, ha sido extensivamente empleada por los fabricantes internacionales de transformadores en sus programas comerciales, siendo aplicada en núcleos de transformadores de distribución tanto monofásicos como trifásicos.

Origen y Evolución

Los metales y aleaciones amorfas se formaron inicialmente por deposición de vapor de metal a temperaturas criogénicas. Este material amorfo se caracteriza por el ordenamiento aleatorio de sus átomos, sin una estructura definida y ordenada; a diferencia de las estructuras cristalinas en donde los átomos, moléculas o iones son empaquetados de manera ordenada y con patrones de repetición que se extienden en las tres dimensiones del espacio. Las primeras aleaciones eran películas delgadas hechas de materiales tales como bismuto y germanio, los cuales no tenían ninguna aplicación práctica, ni siquiera como material de investigación. Estas películas eran muy inestables a temperatura ambiente, y tenían que ser mantenidas a una temperatura cercana al cero absoluto para que mantuviera la estructura no cristalina.

A principios de 1950, la técnica de solidificación rápida de metales fundidos (enfriamiento del líquido) trató de extender la solubilidad sólida de metales en otros metales. No se realizaron mayores progresos hasta 1959, cuando Pol Duwez desarrolló una técnica llamada *gun technique*, la que básicamente permitía producir metal enfriado rápidamente, con una estructura cristalina muy particular, distintas al del metal original. Este descubrimiento estableció que, para producir una aleación metálica amorfa estable, el metal líquido debía ser enfriado a una tasa extremadamente rápida (se estima que debe estar en el orden de 10^6 K/s).

Los primeros estudios de metales rápidamente solidificados correspondían a combinaciones de aleaciones de plata – cobre y plata – germanio. Estos estudios prontamente se propagaron a otras aleaciones: plata – silicio, cobre – germanio, cobre – silicio, plata – germanio y oro – silicio. La aleación oro – silicio era única en cuanto a solidificación rápida, resultando en una fase amorfa cerca del punto de fusión más bajo de la composición. Esta aleación derivó en otra (paladio – silicio), la cual presentaba mayor estabilidad a temperatura ambiente que otros casos anteriores.

Habiendo conseguido una aleación metálica amorfa estable, el siguiente paso del desarrollo era conseguir ferromagnetismo, un estado magnético en que los átomos se encuentran alineados. Afortunadamente, el paladio es un material que, al combinarse con el hierro, mejora las propiedades magnéticas del hierro y por lo tanto hace que la aleación sea más fácil de magnetizar. Reemplazando el paladio por otro metal de transición (como el hierro y el cobalto), Tsuei y Duwez crearon exitosamente amalgamas de paladio – hierro – silicio y paladio – cobalto – silicio, que exhibían características

“ferromagnéticas”. Las propiedades magnéticas de estos materiales amorfos resultaron ser similares a aquellos de metales convencionales con estructuras cristalinas.

En 1966, Duwez y Lin produjeron satisfactoriamente ferromagnetos amorfos basados en una combinación de hierro – fósforo – carbono. Es interesante remarcar que esta aleación se obtuvo literalmente por accidente: un crisol de carbono fue utilizado inadvertidamente durante la combinación de hierro y fósforo, resultando en una aleación con sorprendentes propiedades magnéticas. Este descubrimiento correspondió a la primera aleación amorfa basada en hierro con alta inducción de saturación, lo que abrió la posibilidad de usar este tipo de material en aplicaciones prácticas como lo son núcleos de transformadores.

Alrededor de 1972, Chen y Polk intentaron, con algún grado de dificultad, crear una cinta de dicha aleación. Ellos encontraron que, con la adición de elementos tales como aluminio, silicio, entre otros, se podía mejorar enormemente la formación de la cinta amorfa. Este descubrimiento fue inesperado, ya que la solubilidad sólida del silicio en metales de transición, como el hierro, es alta, lo que sugería la formación estable de fases cristalinas, más que de fases amorfas. El hallazgo se convirtió en poco tiempo en una patente registrada. [8]

Las técnicas disponibles anteriores a 1975 producían cintas de metal amorfo de unos pocos milímetros de ancho (2 – 3 mm). Anchos mayores se obtuvieron cuando Narasimhan desarrolló una técnica de enfriamiento rápido del metal, fundido en forma de lámina, conocida comúnmente en inglés como *Planar Flow Casting*, donde la aleación fundida es eyectada sobre un substrato enfriador en movimiento rotativo constante, obteniéndose una cinta o correa continua de metal.

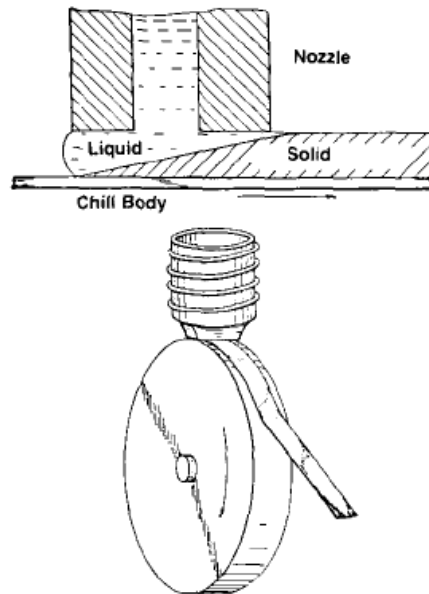


Figura 2.9: Proceso *Planar Flow Casting* (PFC). Notar que la flecha indica la dirección del flujo del material, el cual coincide con la dirección de rotación de la rueda enfriadora.

Composición y Formación

La fórmula general definida en la patente de Chen y Polk [8] para una aleación amorfa térmicamente estable es la siguiente:



Donde:

- M = uno o más metales de los siguientes tipos: hierro, níquel, cobalto, vanadio, cromo
- Y = uno o más metales de los siguientes tipos: fósforo, boro, carbono
- Z = uno o más metales de los siguientes tipos: aluminio, silicio, estaño, antimonio, germanio, indio, berilio.
- a, b, c = porcentaje (atómico) de los elementos M, Y, Z respectivamente.

Con respecto a los factores detallados en minúscula, éstos varían entre 60 – 90, 10 – 30 y 0,1 – 15, respectivamente. La suma de “a”, “b” y “c” debe ser 100.

La formación apropiada para núcleos de transformadores eléctricos está basada en la combinación de hierro – boro – silicio. No obstante, existe una enorme cantidad de estudios y papers que, en búsqueda de ciertas características precisas, han desarrollado otro tipo de aleaciones especiales, aunque siempre basadas en la composición antes mencionada.

Los metales amorfos obtenidos a través del enfriamiento rápido de la aleación fundida, han mostrado que no se pueden obtener por los métodos convencionales de fundición. Tales características incluyen: tamaño refinado del grano, soluciones sólidas extendidas, fases metaestables y vidrios metálicos. La proporción de enfriamiento alcanzada en la rápida solidificación es primariamente controlada por el grosor de la muestra y la naturaleza del contacto interfacial de la muestra.

Los principales métodos de enfriamiento rápido desde la fundición, se muestran en la Figura 2.10, donde:

- a) *Drop-smasher*: Técnica utilizada en investigaciones básicas, conocida también como pistón y yunque enfriador, en el cual una gota de aleación es levitada por una bobina inductora cónica, para luego ser soltada y enfriada entre dos superficies de cobre en movimiento hasta formar un disco.
- b) *Chill block melting-spinning* (CBMS): Técnica similar a PFC, donde se eyecta la aleación sobre la superficie enfriadora, la que con su movimiento rotatorio va formando la cinta continua de metal amorfo.
- c) *Pendant-drop melt extraction*: Técnica de extracción del fundido por goteo, el cual se deposita sobre un sustrato enfriador en movimiento rotatorio constante, obteniéndose un alambre continuo (existe también una versión similar donde la rueda se sumerge en una superficie fundida).
- d) *Twin-roller*: Técnica en donde se utiliza un aparato enfriador de doble rodillo.

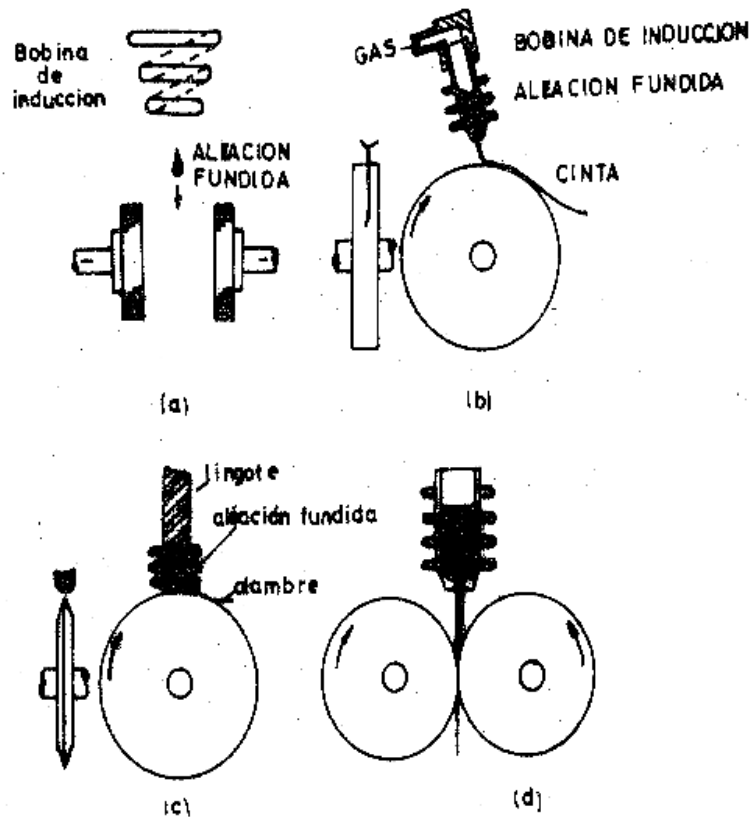


Figura 2.10: Principales métodos de enfriamiento rápido de metales amorfos.

La cinta moldeada de los metales amorfos se produce eyectando el metal fundido, a unos 1400 °C, a través de un tubo pequeño ubicado sobre un molde giratorio, rápidamente enfriado, equivalente a un millón de grados centígrados por segundo, de tal manera que el proceso de solidificación sea del orden de los milisegundos. En la Figura 2.11 se presenta de forma general un esquema del proceso de fabricación de la cinta metálica amorfa.

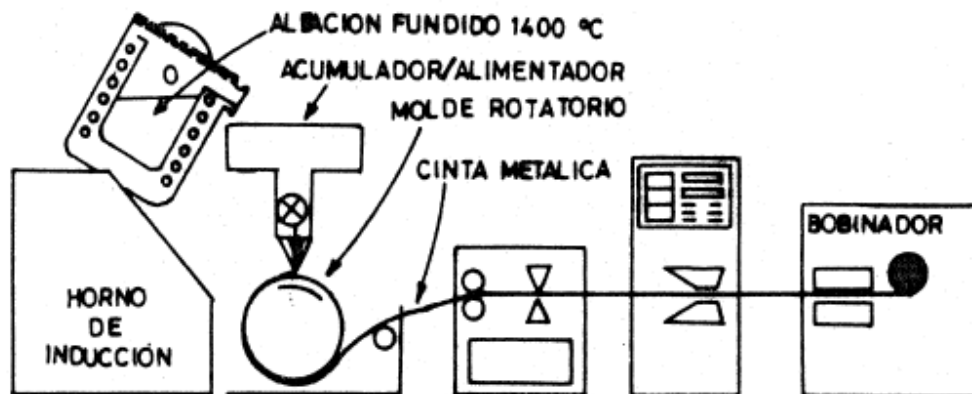


Figura 2.11: Proceso de fabricación de cinta amorfa.

Mediante el proceso PFC (Figura 2.9) se obtiene la cinta amorfa que posteriormente se utilizará en la fabricación de los núcleos para transformadores. La principal característica de este proceso es la formación de un metal fundido estable entre los bordes de una boquilla ranurada y el sustrato, el cual se mueve con una velocidad de 30 m/s. La mezcla estable permite una producción continua de la cinta amorfa, con dimensiones bien definidas. En general, la necesidad de una rápida solidificación limita el espesor de la cinta a menos de 100 μm (normalmente en el comercio el espesor de estas láminas es de 0,025 mm aprox.). En un principio, no debería existir límite para el ancho de la cinta, dado que se mantiene la distancia boquilla ranurada – sustrato a lo largo del ancho de la cinta. Comercialmente se encuentra disponible un ancho máximo de 213 mm; sin embargo, la industria ha desarrollado algunos estudios para permitir la producción de anchos mayores, que permitan en un futuro cercano la producción de transformadores de núcleo amorfo de medias y grandes potencias.

Características del Metal Amorfo

Tal como se ha mencionado con anterioridad, los metales amorfos poseen una estructura atómica no cristalina, sin ejes de simetría y donde los átomos constituyentes están distribuidos aleatoriamente dentro de la mayor parte del material. Su estructura depende de una rapidísima tasa de enfriamiento de la

aleación fundida y la presencia de elementos propensos a formaciones vítreas, como lo es el boro, por ejemplo. Típicamente estas aleaciones contienen un 80% de hierro, con el 20% restante de boro y silicio.

La estructura amorfa de este tipo de material suele ser examinado convenientemente mediante la técnica de difracción por rayos X (*X-ray diffraction*). Los patrones de difracción son similares a los mostrados en la Figura 2.12; en ésta se observa la estructura atómica aleatoria, similar a la de un líquido. Dado que los materiales están en estado sólido, conceptualmente pueden ser llamados “líquidos enfriados”, similar al vidrio. Cuando son calentados, se cristalizan. La temperatura de cristalización T_X depende de la composición química del material. Para la mayoría de las aleaciones de interés basadas en hierro, esta temperatura de cristalización $T_X > 500^\circ \text{C}$.

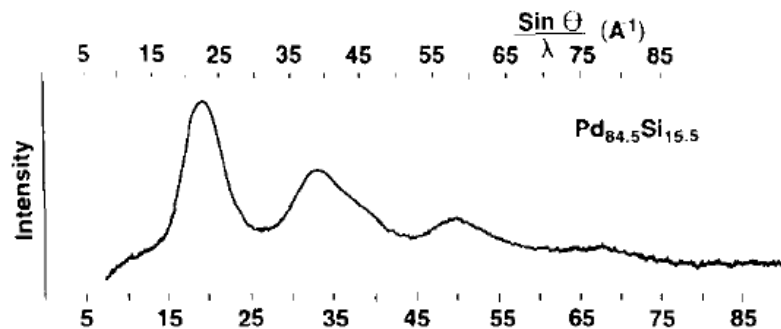


Figura 2.12: Patrones de difracción de rayos X para una aleación de silicio y paladio.

Los metales amorfos poseen variados atributos y propiedades, todos ellos bastante notables. Entre éstos destacan los siguientes:

- Firmeza: El metal amorfo puede soportar esfuerzos que exceden los 4500 MPa (605 Kpsi), magnitud que es cuatro veces la resistencia a la tracción de los aceros de uso eléctrico convencionales.
- Flexibilidad: Las cintas de metal amorfo se pueden doblar hacia atrás en 180 grados; su consistencia ante la quebradura es mejor o igual que el de los típicos aceros altamente resistentes.
- Dureza: El metal amorfo se encuentra entre los materiales más duros; de hecho, poseen un grado de dureza levemente inferior al del diamante (el material más duro según la escala de Vicker). Este grado de dureza corresponde a cuatro o cinco veces el del acero al silicio convencional.

- Resistencia a la corrosión: Algunas de las aleaciones amorfas son resistentes al agua salada y al ácido sulfúrico, incluso mucho más que los aceros inoxidable policristalinos.
- Alta permeabilidad magnética: Los aceros amorfos se magnetizan muy fácilmente; esto vence uno de los problemas de los aceros fuertes, que poseen una considerable resistencia a la magnetización.

Pese a su gran dureza, las aleaciones amorfas son bastante fáciles de trabajar y formar. Esta combinación de propiedades mecánicas hace que el acero amorfo sea una clase única de material. Son excelentes materiales estructurales, pero son difíciles de cortar y perforar.

La disposición aleatoria de los átomos de las aleaciones amorfas se refleja en características químicas, magnéticas y eléctricas muy particulares. De éstas, las propiedades magnéticas son las que atraen una mayor atención; a continuación se detallan las características más relevantes asociadas al uso en transformadores eléctricos:

- Transición y Saturación Magnética

Cuando un material magnético es magnetizado por un campo externo (H), una inducción magnética (B) aparece en el material. Como la intensidad de campo externo aumenta a valores muy grandes, la inducción magnética alcanza la saturación (B_S). La inducción de saturación está relacionada con el momento de saturación atómico promedio, μ_s . El valor B_S tiene dependencia con la temperatura, y adopta un valor prácticamente igual a cero cuando $T = \theta_f$ (temperatura de Curie). El valor de θ_f depende del momento atómico, del número de átomos magnéticos vecinos más cercanos y del tamaño de las interacciones magnéticas entre estos átomos. Así, B_S y θ_f son las cantidades básicas que caracterizan el ferromagnetismo de un material; obviamente, mientras mayores sean estos valores, mejor es el material para aplicaciones como núcleos de transformadores.

En el caso de aleaciones amorfas con 80% de hierro y 20% de boro, se observa que θ_f decrece con el contenido de hierro de la aleación (Figura 2.13); para incrementar este valor, es efectiva la adición de silicio. Sin embargo, el aumento de la combinación boro + silicio tiende a reducir el valor de B_S . La composición óptima debe ser aquella en que la dependencia de la temperatura de B_S sea la menor posible debajo de la temperatura de operación del transformador.

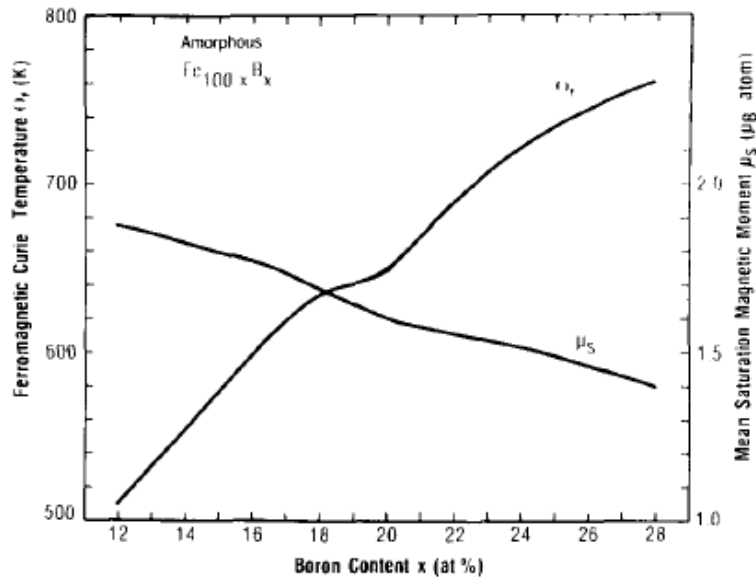


Figura 2.13: Momento de Saturación magnética (μ_s) y Temperatura de Curie (θ_c) para aleación amorfa Fe-B.

- Magnetoestricción

Las dimensiones físicas de un material magnético cambian cuando éste es magnetizado. Este fenómeno llamado magnetoestricción surge de la interacción magnética entre átomos y ocurre en todos los materiales magnéticos, al margen de su disposición atómica. Los cambios dimensionales están en el orden de 10^{-6} ppm para la mayoría de los metales blandos, y provocan ruido y/o pérdidas magnéticas.

En el caso de aplicación en transformadores, la aleación amorfa basada en hierro exhibe una magnetoestricción de saturación lineal (λ_s) de 30×10^{-6} ; el cual es muy similar a los 27×10^{-6} que se presentan en los aceros al silicio convencionales.

- Anisotropía Magnética

Un material ferromagnético es usualmente anisotrópico magnéticamente; esto es, posee una propiedad magnetizante direccional hacia el punto donde le es más fácil magnetizarse. Así, la magnetización está dirigida hacia dicho camino cuando un campo magnético externo es aplicado en el material. La energía magnética asociada a este fenómeno es llamada energía anisotrópica (K). Cuando el material ferromagnético es excitado por un campo externo, la magnetización del material responde de manera tal

que la energía total, incluyendo K , se vuelve mínima. El parámetro K afecta la magnetización, ya que está íntimamente relacionada con la permeabilidad magnética, coercitividad y configuración del dominio magnético. K esencialmente determina el rendimiento magnético de un material.

En el caso de aplicaciones en transformadores, se observa que para el acero al silicio convencional la anisotropía magnética en el eje, el valor de K es de 10^{-4} J/m^3 ; mientras que para aleaciones amorfas este valor está entre $500 - 1000 \text{ J/m}^3$. La anisotropía magnética en los metales amorfos se desarrolla durante la formación del material, pero puede ser modificada posteriormente con tratamientos de calor.

- Pérdidas Magnéticas

El proceso de magnetización no es lineal, resultando en una forma de la curva de histéresis B-H bajo magnetización variable. Las pérdidas corresponden al área formada por dicha curva B-H. Las pérdidas aumentan con la frecuencia de excitación y se divide en dos componentes principales: P_h (pérdidas por histéresis) y P_f (pérdidas por corriente de Foucault).

El parámetro P_f es proporcional al máximo nivel de inducción, frecuencia de excitación, espesor del material y constante del material, e inversamente proporcional a la resistividad del material (ecuación 2.18); y el parámetro P_h es proporcional a la coercitividad del material, el que está relacionado con la homogeneidad magnética del material.

A frecuencias industriales (50/60 Hz), P_h y P_f son comparables; en la Figura 2.14 se detalla la tendencia histórica de la reducción de pérdidas en el núcleo de transformadores de 50 kVA, de aceros al silicio y aleaciones amorfas.

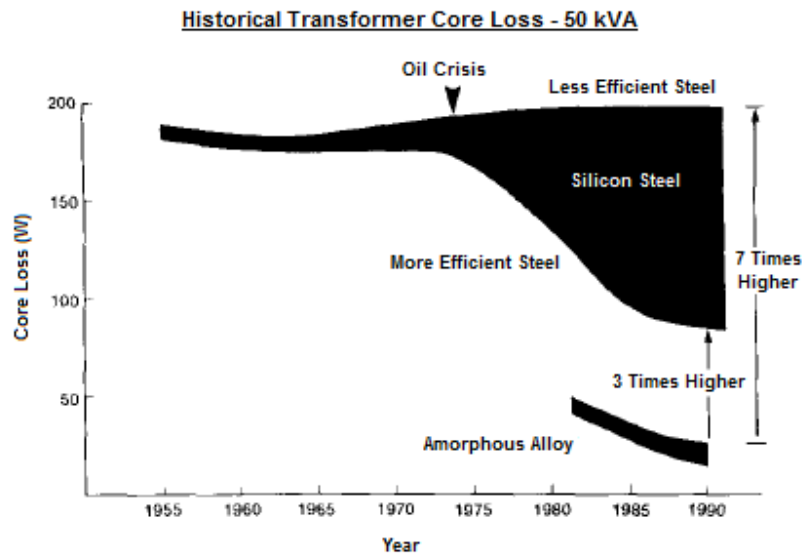


Figura 2.14: Tendencia histórica de pérdidas en el núcleo para aceros convencionales y amorfos.

Comparación de Metal Amorfo con Aceros Convencionales en Transformadores de Distribución

Históricamente ha existido un interés especial en transformadores con núcleo amorfo, especialmente cuando el tema de la eficiencia energética comenzó a tomar fuerza hacia mediados de 1970; no obstante, este interés decayó ostensiblemente a mediados de 1990 cuando los costos de energía decayeron. Además, los costos iniciales de un transformador de núcleo amorfo son más altos que los de aquellos con núcleo de acero al silicio convencional: primero, el material amorfo por sí mismo es más caro que el acero convencional y segundo, la densidad de flujo de saturación magnética del acero amorfo es más bajo que el del acero al silicio (se estima que es un 20% menos, aproximadamente). De esta manera, se necesitan núcleos amorfos de tamaños más grandes para alcanzar los valores habituales de densidad de flujo de los aceros convencionales; esto resulta en costos iniciales por unidad más altos.

Sin embargo, los costos iniciales pueden ser compensados con costos de operación más bajos a lo largo de la vida útil (esperada) del transformador, debido principalmente a las bajísimas pérdidas en vacío que poseen los aceros amorfos.

Actualmente los transformadores con núcleo amorfo se han convertido en una excelente oportunidad de negocio, comercialmente disponibles, y competitivos en costo con respecto a los equipos de distribución convencionales. Esto se debe a los siguientes factores [9]:

- Aumentos recientes en los costos de la energía.
- Suministro de combustibles fósiles se ha convertido en poco fiable, y su costo impredecible.
- Aumentos en los costos de los materiales básicos para núcleos y conductores de transformadores.

De todas maneras, se debe mencionar el siguiente logro significativo: las inducciones de saturación magnética de aleaciones amorfas basadas en hierro han aumentado en los últimos años, resultando en tamaños más pequeños de transformadores y, consecuentemente, reducción de costos de materiales.

Un ejemplo de esto lo constituye un estudio realizado por ingenieros japoneses [10], en el que detallan la fabricación de un transformador con una nueva aleación amorfa (Metglas 2605HB1), la que tiene una inducción de saturación más alta que las aleaciones comercialmente disponibles basadas en hierro. Esto ha resultado en un transformador con dimensiones prácticamente iguales a los equipos construidos con los aceros convencionales de acero de grano orientado.

Metal Amorfo v/s Acero al Silicio de Grano Orientado

El metal amorfo corresponde a una aleación única de fierro, silicio y boro (principalmente), producido mediante una técnica de rápida solidificación desde la fase líquida donde la estructura del metal ocurre con patrones aleatorios, a diferencia del acero al silicio de grano orientado convencional, el cual posee una estructura cristalina organizada.

Esta falta de “orden a gran escala” explica las bajas pérdidas de un núcleo amorfo por sobre el núcleo de acero al silicio. Las pérdidas en el núcleo, tal como se ha explicado largamente, se dividen en pérdidas por magnetización y pérdidas por corrientes de Foucault.

Una medida de las pérdidas de magnetización de un material magnético es el área determinada por su curva de histéresis B-H. Puede observarse claramente en la Figura 2.15 que el área formada por la curva del material amorfo es bastante más pequeña que la formada para el acero convencional de grano orientado (en este caso, de un acero al silicio grado M2).

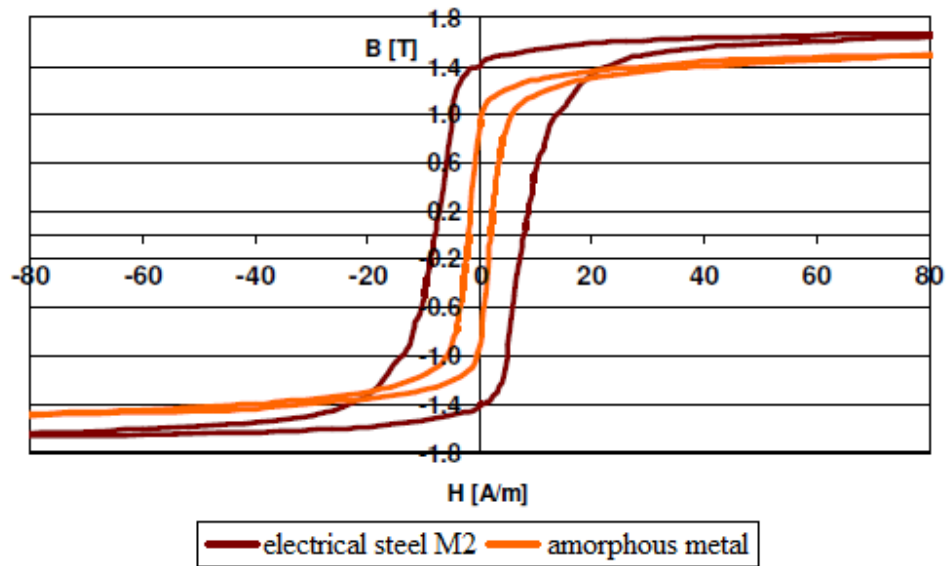


Figura 2.15: Curva de Histéresis B-H para aleación amorfa y acero al silicio cristalino grado M2. Medidas tomadas en núcleos de transformadores de distribución de 70 kg de peso aprox.

Otro factor indicativo de la facilidad de magnetización de los metales amorfos es el alto valor de su permeabilidad magnética relativa, la cual se puede desprender de la curva B-H de la Figura 2.15, y más directamente en los valores de la Tabla 2.4.

COMPARISON OF MAGNETIC CHARACTERISTICS BETWEEN AMORPHOUS METAL AND CRGO STEEL

Characteristic	Amorphous Metal	CRGO steel
B saturation [T]	1.56	2.0
B design admsib. [T]	1.35	1.8
Magnetic permeability	3.5e5 for H<10 A/m	6.0e4 for H<10 A/m

Tabla 2.4: Comparación de características magnéticas entre metal amorfo y acero al silicio de grano orientado [9].

Las pérdidas por corrientes de Foucault en el núcleo son reducidas por un incremento de la resistividad eléctrica de la aleación amorfa. La falta de un orden atómico y el alto contenido de soluto en los metales amorfos resulta en un camino o trayectoria media limitada para los electrones; lo cual no ocurre en los materiales cristalinos. Esto produce un aumento de la resistividad eléctrica.

Además, el grosor de las láminas de la aleación amorfa es mucho más pequeño que el de los aceros convencionales, lo que también conduce a una resistencia eléctrica total más grande. Finalmente, una alta resistencia eléctrica suprime las corrientes de Foucault producidas por las interfaces separadoras de los dominios magnéticos, que son propiedades intrínsecas del material (*domain-wall motion*); lo que hace disminuir las pérdidas por corrientes de Foucault en el núcleo.

Uno de los retos más importantes para los fabricantes de transformadores amorfos es la dureza del material, ya que esta es del orden de cuatro o cinco veces más duro que el acero al silicio. Es por ello que las herramientas convencionales de corte, incluso si poseen puntas de carburo, se desgastan un millar de veces más rápido cortando acero amorfo comparado con el acero de grano orientado.

La delgadez del material amorfo es otra cualidad distintiva con respecto al acero convencional. El espesor de una lámina amorfa es de 0,025 mm, casi un décimo del grosor de una lámina de acero al silicio. Esta delgadez, combinado con su superficie irregular, le otorga al metal amorfo un factor de apilamiento o índice de compactación (esto quiere decir, la proporción entre el espacio efectivamente utilizado por el metal y la cantidad de espacio libre disponible) de 85%, comparado con el 95 – 98 % o más del acero al silicio. Un factor de apilamiento bajo se traduce en un núcleo de mayor tamaño, con el consecuente incremento en los conductores, estanque y volumen de líquido aislante del transformador.

Otra desventaja del material amorfo es su inherente bajo valor de inducción de saturación magnética, comparado con el acero al silicio convencional. El acero convencional se satura en 2,0 T, mientras que el acero amorfo lo hace en 1,58 T (ver Figura 2.15), aproximadamente. Esta limitación se refleja en un mayor tamaño del núcleo, el que consecuentemente hace crecer cantidad y tamaño de conductores y estanque.

Por último, otro factor que incrementa la complejidad en la fabricación de núcleos amorfos es la necesidad de templar dicho acero en presencia de un campo magnético para que el metal alcance todo su potencial en cuanto a bajas pérdidas en vacío y una baja potencia de excitación.

En los Anexos “A”, “B” y “C” se pueden observar diversos gráficos que representan las principales características de aceros al silicio convencionales, aceros amorfos comercialmente disponibles y comparación directa de características de ambos tipos de aceros, respectivamente.

Situación Actual Mundial

La aplicación de transformadores con núcleo de acero amorfo se ha intensificado durante las últimas décadas. Por ejemplo, en EEUU, desde 1980 hasta 1995, se instalaron sobre 500.000 unidades, con excelentes resultados en la práctica. Este tipo de equipos han sido implementados con especial fuerza en países asiáticos como India, China y Japón; logrando tener instalados en todo el mundo alrededor de 1.250.000 unidades.

Por ejemplo, en Japón se encuentra el promotor más grande a nivel mundial de este tipo de tecnología (Hitachi/Metglas), con un mercado disponible de 3 millones de unidades y algunos miles de unidades trifásicas. La capacidad de producción de dicha empresa es de 50.000 toneladas de cinta amorfa anual hacia el 2007, y de 100.000 en el año 2010 [6]. La producción de transformadores del 2007 de Hitachi Metals es equivalente a 60.000 unidades trifásicas de 400 kVA.

En tanto, la India actualmente es el usuario más grande de unidades amorfas; la cantidad de equipos instalados en esta nación iguala a la instalada en el resto del mundo. De hecho, posee la industria elaboradora de transformadores amorfos más grande del planeta.

Asimismo, China ha alcanzado un rol preponderante, pues se ha convertido en el mayor comprador de acero amorfo a nivel mundial. De hecho, es uno de los mayores fabricantes de cinta amorfa y transformadores amorfos; tanto así que la potencia instalada anual es de 20.000.000 kVA, haciendo un total de 70.000.000 kVA instalados.

Otros países asiáticos que han implementado este sistema, todos mercados tendientes al crecimiento sostenido, son Taiwán, Bangladesh, Corea del Sur, Filipinas, etc.

En Europa, la adopción de los transformadores de metal amorfo (AMT, siglas del inglés *Amorphous Metal Transformer*) ha sido bastante lento. Esto se debe a que la mayoría de los transformadores de distribución en dicho continente se fabrican con núcleos apilados (*stacked core*), siendo que la aleación amorfa es casi por esencia para ser implementado en núcleos tipo enrollado (*wound core*). Algunos países han iniciado varios proyectos pilotos; entre ellos, se cuenta a España, Bélgica y más recientemente Alemania con una planta de producción de transformadores, a cargo de la empresa ABB.

La nación que tiene una de las plantas instaladas más grandes del mundo y, sin duda, el que tiene mayor experiencia operacional con esta tecnología es Estados Unidos. Pese a que este mercado tuvo un crecimiento sostenido desde 1980 hasta 1995, tuvo un período fuerte de estancamiento, debido a la reestructuración del mercado (debido a la desregulación vigente en esa época). Con las nuevas regulaciones, el mercado interno resurgió hacia el 2010, acercándose a los niveles de mediados de 1990. Canadá y México han iniciado acercamientos con esta tecnología, mediante la instalación de incipientes plantas de fabricación. Similar situación se presenta en Brasil.

Proyección del Mercado

La tendencia del mercado de material amorfo para transformadores de distribución (año 2006) se puede visualizar en la Figura 2.16. Ésta indica la distribución de transformadores amorfos por países, donde cerca de 22.000 toneladas de acero amorfo son utilizados. Hitachi Metals / Metglas ha presentado estudios donde se menciona que la capacidad de producción de stock de material amorfo en 2008 era de 50.000 toneladas, incrementándose a 100.000 en 2010 (aunque no se especifica cuanto de este material se destinará a aplicaciones en transformadores de distribución) [6].

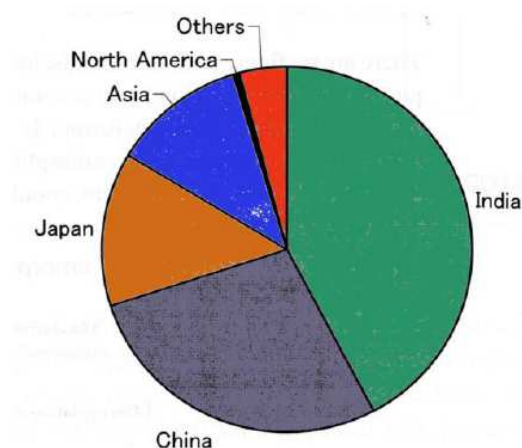


Figura 2.16: Distribución de transformadores amorfos por países (2006, Effitrafo ENDESA, Mayo 2008).

Basado en la figura anterior, y si como suposición se considerara 400 kVA como la potencia promedio de los transformadores instalados, con un núcleo promedio de 600 kg, cada año se producen alrededor

de 37.000 transformadores amorfos, lo que correspondería al 1,2% del total de ventas anuales a nivel mundial. Esto solamente tenderá al alza: dado el crecimiento de mercado esperado indicado por Hitachi, la participación o cuota de mercado se podría incluso doblar (o más) el año 2010.

Finalmente se presenta un gráfico que representa la evolución de la tendencia del mercado de los transformadores amorfos (cantidad de unidades) con respecto al tiempo (años), donde se indican algunos hitos importantes de las últimas dos décadas.

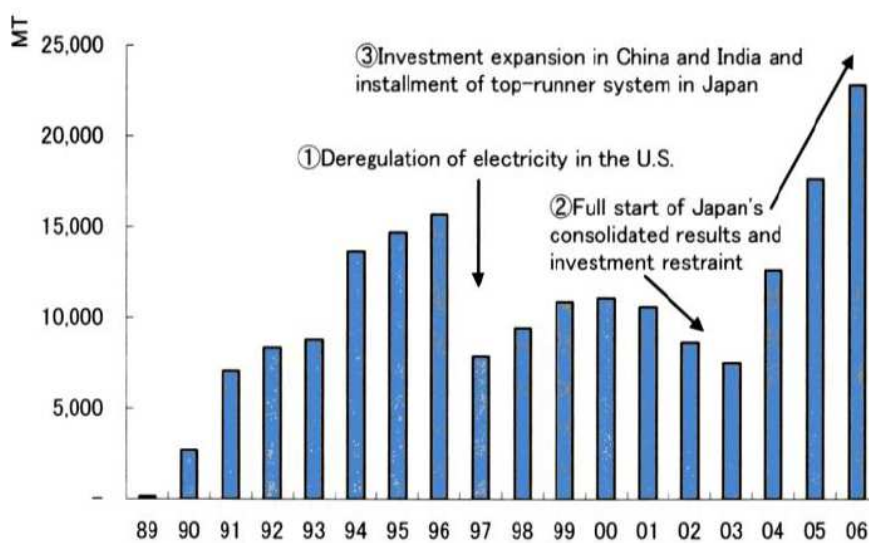


Figura 2.17: Tendencia del mercado amorfo en transformadores de distribución (2006, Effitrafo ENDESA, Mayo 2008)

CAPÍTULO 3

DISEÑO DE PARTE ACTIVA PARA NÚCLEOS DE METAL AMORFO EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

Empleo del Acero Amorfo en Transformadores de Distribución

Para obtener una aplicación exitosa del metal amorfo en transformadores de distribución, debe existir un incentivo técnico-económico tanto para el usuario o cliente final, el fabricante del transformador y el productor del acero amorfo. Las características de bajas pérdidas en vacío del acero amorfo en conjunto con el valor creciente de la energía proveen el incentivo básico que hace al metal amorfo un candidato potencial ideal para núcleos de transformadores eléctricos. [11]

Las características del metal amorfo son significativamente diferentes de los aceros de uso eléctrico convencionales utilizados hoy en día; por lo tanto, la aplicación del metal amorfo no constituye una sustitución directa, ya sea en términos de diseño magnético o de la configuración física del conjunto núcleo – bobinas.

Factores incidentes en la Aplicación del Metal Amorfo

El grado de éxito de la tecnología del metal amorfo resulta de la compleja interacción de los siguientes factores [11]:

- El valor relativo de la energía eléctrica.
- Las características y costos del metal amorfo.
- El desarrollo de configuraciones de diseño innovadoras y nuevas tecnologías de fabricación.

El dejar de tomar en cuenta cualquiera de estos factores daría como resultado último el fracaso en la aplicación del metal amorfo en los transformadores de distribución.

Requerimientos exigidos a un Transformador de Distribución con Acero Amorfo

Los transformadores fabricados con núcleo de algún tipo de aleación amorfa deben cumplir cabalmente las mismas normativas que rigen a los transformadores de distribución de acero convencional.

Los requerimientos básicos exigidos a un transformador de distribución son los siguientes [12]:

- Confiabilidad para más de 25 años.
- Bajas pérdidas en vacío y con carga.
- Costos de inversión bajo y costo total bajo.
- Corriente de excitación que no sea más de un 3% de la corriente a plena carga.
- Factor de interferencia telefónica aceptable.
- Nivel de ruido que estén de acuerdo con los estándares NEMA (o algún equivalente).

Efectos del Metal Amorfo en el Diseño del Transformador

Existen algunas propiedades fundamentales y únicas de las aleaciones amorfas (vistas en detalle en el Capítulo 2) que claramente definen las posibles configuraciones de diseño del transformador fabricado con un núcleo amorfo. Estas propiedades deben ser adecuadamente consideradas por el diseñador del transformador, tanto en su lógica de cálculo (diseño teórico) así como en su implementación física (fabricación y prueba del equipo):

- Espesor

El espesor nominal de las láminas del metal amorfo es una clase de magnitud más baja que el espesor de los aceros convencionales de uso eléctrico. Esto incide en una mayor cantidad de láminas amorfas requeridas para fabricar un núcleo, lo que representa un efecto adverso en un nivel de producción masiva de este tipo de núcleos.

Además, la gran cantidad de láminas delgadas provoca que el procedimiento de unión de un núcleo se torne muy laborioso y caro; es por ello que el concepto de un núcleo de metal amorfo sin uniones se vuelve muy atractivo a nivel de producción en masa.

Finalmente, un núcleo compuesto por muchas laminaciones no será capaz de sostenerse por sí solo, por lo que necesita algún tipo de soporte que mantenga la forma del núcleo. No obstante, se debe tener precaución con el tipo de soporte a utilizar, ya que cualquier método de compresión de las láminas debe ser lo suficientemente sutil para no provocar tensiones mecánicas intensas, pues el acero amorfo es en extremo frágil, por lo que cualquier sobrepresión puede provocar que el acero supere su límite de flexión [13].

Una compresión inadecuada de las láminas puede afectar las propiedades magnéticas y físicas del acero amorfo. En las Tablas 3.1 y 3.2 se muestra la influencia en las pérdidas en vacío del prensaje del núcleo en su zona central y en los extremos laterales, respectivamente, para distintos niveles de compresión [14].

PRESSURE	Po at 1T	Po at 1.3T	Po at 1.6T	Io at 1.3T	Io at 1.6T
00 N/mm ²	18.4W = 100%	32.1W = 100%	72W = 100%	0.518A = 100%	6.25A = 100%
40 N/mm ²	19.9W = 108%	34.5W = 108%	80W = 111%	0.663A = 128%	6.56A = 105%
60 N/mm ²	20.2W = 110%	35W = 109%	82W = 114%	0.715A = 138%	6.67A = 107%
80 N/mm ²	20.4W = 111%	35.3W = 110%	84W = 117%	0.729A = 141%	6.73A = 108%
00 N/mm ²	18.2W = 99%	31.6W = 98%	67W = 93%	0.498A = 96%	6.30A = 101%

Tabla 3.1: Pérdidas en Vacío para distintas inducciones y distintos niveles de compresión (zona central del núcleo).

PRESSURE	Po at 1T	Po at 1.3T	Po at 1.6T	Io at 1.3T	Io at 1.6T
00 N/mm ²	18.2W = 100%	31.6W = 100%	67W = 100%	0.498A = 100%	6.29A = 100%
60 N/mm ²	20.1W = 110%	34.4W = 109%	76W = 109%	0.802A = 161%	7.10A = 113%
90 N/mm ²	22.3W = 123%	37.6W = 119%	86W = 119%	1.116A = 224%	7.82A = 124%
00 N/mm ²	18.8W = 103%	32.3W = 102%	68W = 102%	0.580A = 116%	6.43A = 102%

Tabla 3.2: Pérdidas en Vacío para distintas inducciones y distintos niveles de compresión (extremos laterales del núcleo).

- Dureza

La característica de gran dureza de la aleación amorfa, en conjunto con su extrema delgadez, hace que el material sea sumamente difícil de cortar y ranurar (troquelar), por lo que las herramientas

convencionales de corte verían reducidas drásticamente su tiempo de operación. De hecho, se necesita maquinaria especial para este tipo de trabajo, muy distinto a los utilizados con los aceros al silicio [13].

De lo anterior se desprende que las mejores configuraciones núcleo – bobinas serán aquellas en que se requieran pocos cortes del material (por ejemplo, núcleos sin juntas o uniones), con anchos de láminas moldeados y predefinidos en su longitud.

Por lo tanto, y dado que comercialmente el metal amorfo está disponible en láminas muy delgadas de anchos predefinidos (142, 170 y 213 mm), el uso en núcleos apilados es complejo, permitiendo la proliferación de aplicaciones en núcleos tipo enrollado principalmente. No obstante, existen algunas investigaciones y prototipos de transformadores con núcleos apilados [15] [16].

- Factor de Apilamiento

Ya que el metal amorfo está moldeado en forma definitiva en su espesor, la aleación puede presentar una superficie áspera y espesores no uniformes a lo largo y a lo ancho; situación que definitivamente no sucede en los aceros al silicio tradicionales, los cuales son prensados hasta obtener el espesor final de longitud fija.

La combinación de delgadez, superficie áspera y variaciones en el espesor del metal amorfo afectan directamente el factor de apilamiento que se puede obtener en la construcción del núcleo; en las aleaciones amorfas convencionales es del orden del 80 – 85%, comparado con el factor de apilamiento del acero al silicio, que es del orden del 95 – 98%.

Consecuentemente, un núcleo de metal amorfo requerirá cerca del 18% adicional de área transversal que los aceros convencionales, para obtener la misma área efectiva. El núcleo resultante muestra la tendencia a que algunas láminas resbalen y se junten con laminaciones adyacentes, lo que indica la necesidad de un soporte adecuado para dicho núcleo.

En los últimos años el factor de apilamiento del metal amorfo ha sido mejorado notablemente mediante técnicas novedosas; por ejemplo, mediante la aplicación de adhesivos especiales entre las distintas laminaciones o grupos de éstos [17], o formando láminas más gruesas que las convencionales, utilizando un método especial de apilamiento, considerando “grupos de láminas”. Además, nuevas tecnologías en

maquinarias han permitido la fabricación de láminas con superficies menos ásperas y de espesores cada vez más uniformes.

Todos estos desarrollos han permitido, por ejemplo, la construcción de transformadores amorfos cuyos núcleos presentan factores de apilamiento entre 87,3 – 87,6%, acercándose rápidamente al 90% en estudios preliminares [18].

- Templado

Los aceros de uso eléctrico convencionales son orientados magnéticamente y se les baja la tensión interna; cuando son recibidos por el fabricante de transformadores, se requiere de un proceso de templado sólo cuando a éstos se les aumente la tensión interna durante la fabricación del núcleo. En contraste, el metal amorfo no es orientado magnéticamente y posee una alta tensión interna, resultante del proceso de fabricación de la cinta metálica. Por ende, se aumenten o no las tensiones internas durante el proceso de fabricación del núcleo, se debe temprar dentro de un campo magnético, con el fin de desarrollar las mejores propiedades magnéticas.

El templado óptimo es un proceso crítico: debe ser lo suficiente para disminuir tanto como sea posible la tensión interna, pero sin ser tan severo como para provocar la cristalización del material amorfo. Debido a que este tratamiento de calor no puede disminuir toda la tensión interna del metal, es provechoso utilizar una configuración núcleo – bobinas que minimice las tensiones internas producidas durante la fabricación del núcleo.

Un estudio reciente [19] expuso que la combinación adecuada de temperatura de recocido, tiempo de recocido y magnitud de campo magnético es óptima para reducir las pérdidas en el núcleo y la potencia de excitación. Para ello, los investigadores aplicaron al metal un campo magnético longitudinal, midiendo las pérdidas y los VA de excitación para cada uno de los tres casos, notando que en todos ellos las curvas decrecen a un valor mínimo y luego aumentan, lo que indica que existe un punto óptimo de magnitud de campo magnético aplicado longitudinalmente (Figuras 3.1, 3.2 y 3.3), donde se minimizan las pérdidas y potencia de excitación. Es decir, se comprueba la necesidad de la adecuada aplicación del proceso de templado en las aleaciones amorfas para obtener las mejores propiedades.

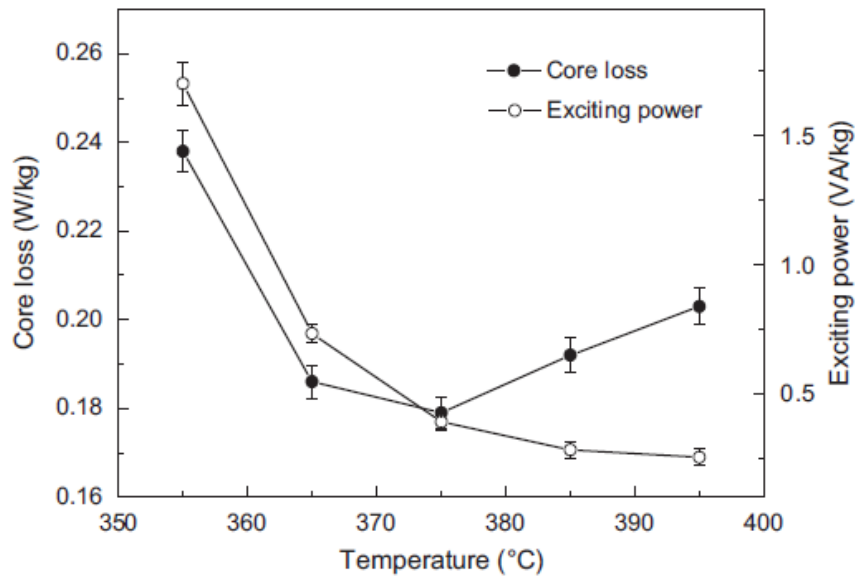


Figura 3.1: Dependencia de las pérdidas en vacío y potencia de excitación con la temperatura de templado (valores medidos a 50 Hz y 1,35 T, en un transformador de 630 kVA, durante 90 minutos, con un campo magnético longitudinal de 46 Oe).

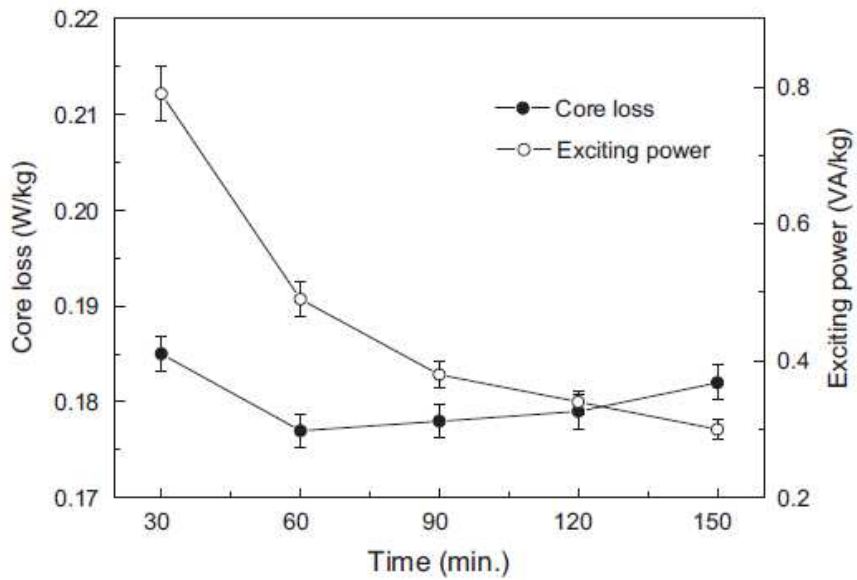


Figura 3.2: Dependencia de las pérdidas en vacío y potencia de excitación con el tiempo de templado (valores medidos a 50 Hz y 1,35 T, en un transformador de 630 kVA, a 375 °C, con un campo magnético longitudinal de 46 Oe).

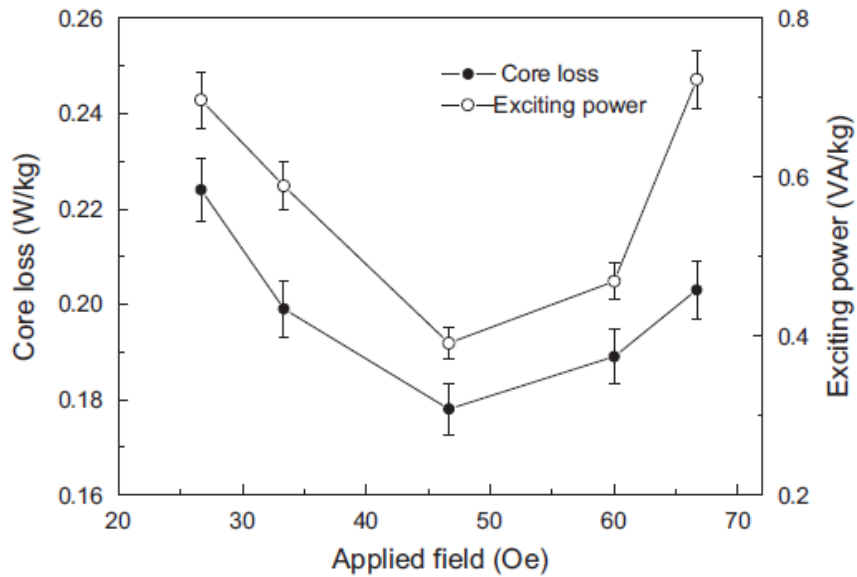


Figura 3.3: Dependencia de las pérdidas en vacío y potencia de excitación con el campo magnético aplicado longitudinalmente (valores medidos a 50 Hz y 1,35 T, en un transformador de 630 kVA, a 375 °C, durante 90 minutos).

Considerando los factores anteriormente descritos, es probable que el diseño del transformador con núcleo de metal amorfo difiera en forma significativa de su similar de acero al silicio convencional de grano orientado. Por supuesto, tendrá menos pérdidas, pero utilizará más material en el núcleo y más material en los conductores. La configuración de la parte activa del transformador amorfo puede ser distinta a las configuraciones estándar de fabricación, lo que puede conllevar problemas para la producción en masa de este tipo de equipos. Además, para prevenir aumentos de costos en el volumen de aceite, es probable que la forma del estanque tenga que adecuarse lo más posible a cualquier innovación en la disposición del núcleo y las bobinas.

Consideraciones Previas y Evaluación de Tipos de Diseño

El diseño de un transformador con un material relativamente nuevo como lo es el acero amorfo representa todo un desafío, a nivel teórico así como práctico. Existe un gran número de diseños distintos

que pueden ser más o menos aptos para construir un transformador de distribución con núcleo de metal amorfo. A continuación se discutirá algunos de las posibles configuraciones consideradas prácticas.

a) Núcleo Cruciforme

Este concepto ha sido usado en transformadores grandes por muchos años. Básicamente se ensamblan múltiples bucles o *loops* de material amorfo, de dimensiones variables, de manera tal de que la sección transversal de las piernas del núcleo se aproxime a una configuración circular. Dependiendo de factores económicos, se utilizan de 5 a 9 bucles, resultando en un factor de espacio del 84 – 90%. Un diseño tipo acorazado resulta en un núcleo con mínimo contenido de material, pero doble en el número de vueltas comparado con un diseño tipo núcleo. Las bobinas se enrollan en cilindros seccionados directamente sobre el núcleo ensamblado.

Este diseño resulta en un buen desempeño tanto del núcleo como de las bobinas. Los núcleos son enrollados, ensamblados y templados con pocas perturbaciones. La construcción de las bobinas es bastante sencilla, que provee un nivel alto de cortocircuito y rigidez dieléctrica. Sin embargo, esta configuración requiere un estanque grande, el cual utiliza más aceite. El sistema de sujeción de la parte activa también es un tema complejo, pues se debe evitar inducir tensiones mecánicas al núcleo. Los conductores de las bobinas, así como las cables de las derivaciones y salidas hacia los aisladores deben tener un diseño tal de minimizar las protuberancias en los enrollados y alrededores.

Esta disposición requiere una inversión considerable en términos de disponer maquinaria apta para cortar el material del núcleo. El trabajo de montaje del núcleo y bobinas son más complicadas que para otras configuraciones (por ejemplo, diseño de núcleos con gaps distribuidos).

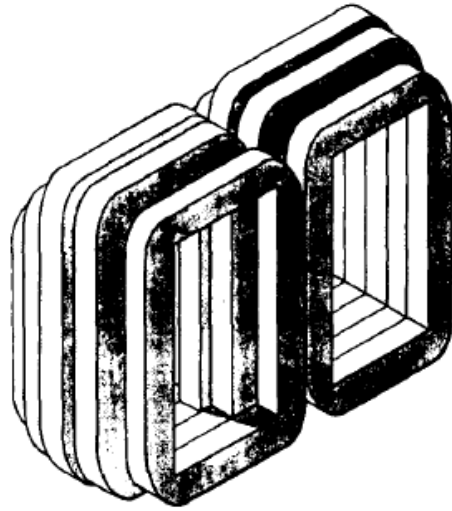


Figura 3.4: Diseño típico de núcleo cruzado.

b) Núcleo Toroidal

Las configuraciones toroidales suelen utilizarse en pequeños autotransformadores y transformadores para instrumentación. El núcleo es enrollado con una tira continua de metal amorfo. Este núcleo es templado, y múltiples secciones de la bobina son enrolladas alrededor de la pierna rectangular del núcleo. Dado que el núcleo no tiene cortes ni juntas, las bobinas se enrollan con una máquina bobinadora, la cual pasa a través de la ventana del núcleo una vez por cada vuelta.

El rendimiento del núcleo con este diseño es excelente. Un toroide sin perturbaciones es la configuración ideal, donde el núcleo es soportado en su borde, reduciendo tensiones mecánicas. En cambio, el desempeño de las bobinas es un área de preocupación, pues existe poca experiencia con el diseño de este tipo de configuraciones. De hecho, el proceso de embobinado requerirá un fuerte desarrollo, con nuevos conceptos, métodos y maquinarias. Claramente, este proceso es mucho más costoso que en otras configuraciones de diseño convencionales.

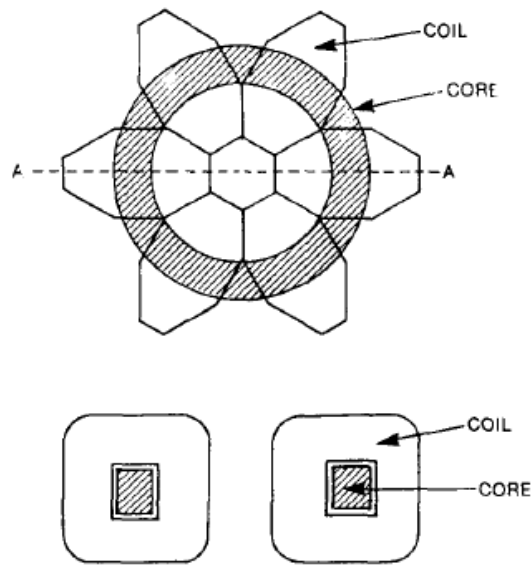


Figura 3.5: Diseño típico de núcleo toroidal (sección transversal rectangular).

Comercialmente, en EEUU se está ofreciendo un transformador amorfo con diseño toroidal, y en Japón, al menos, se ha probado algunos prototipos de este mismo diseño [20].

c) Núcleo con Gaps Distribuidos

El diseño de núcleo tipo enrollado (*wound core*) con gaps distribuidos y bobinas rectangular pre-enrolladas constituye una configuración de parte activa muy efectiva en cuanto al costo. Ha sido usado en transformadores de distribución con aceros al silicio de grano orientado por más de 45 años.

El proceso de fabricación de un núcleo de acero al silicio con esta configuración es tal como sigue: un núcleo redondo con forma de rosquilla es enrollado, cortado y encajado mediante un patrón de junta tipo escalonado; esta estructura que se forma exhibe una ventana rectangular en la zona central. En las dos piernas del núcleo se montan las bobinas de baja y alta tensión, respectivamente.

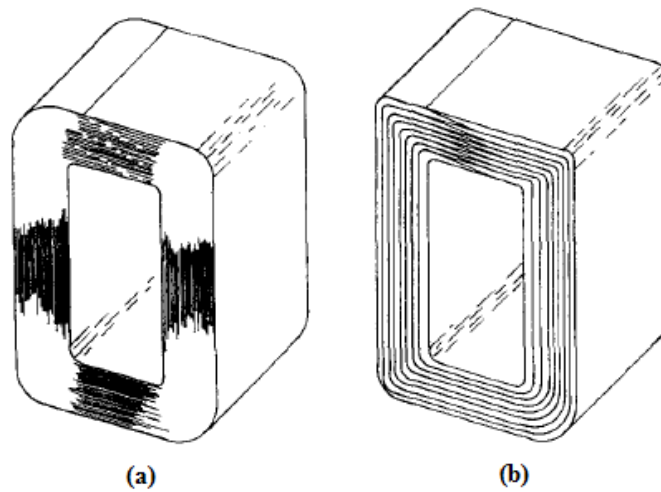
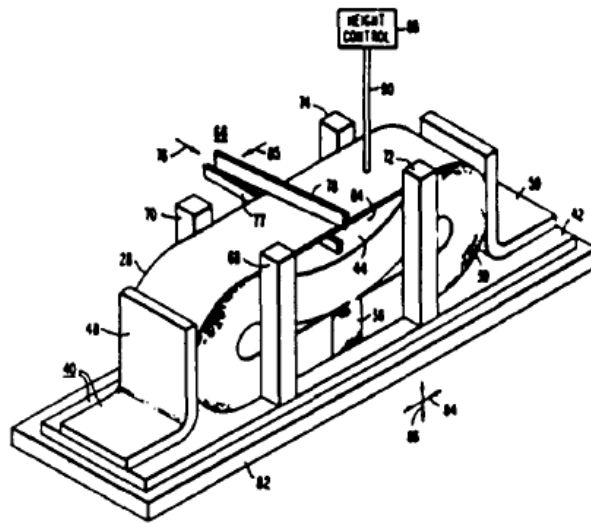


Figura 3.6: Diseño típico de núcleo con gaps distribuidos para: (a) acero al silicio de grano orientado convencional, (b) metal amorfo.

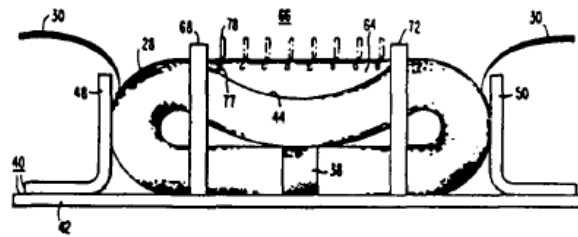
El rendimiento del núcleo con gaps distribuidos es más pobre que el diseño cruciforme o toroidal, pues el núcleo debe ser intervenido para encajar el núcleo con las bobinas. Este bajo desempeño se produce porque esta distorsión ocurre después de que el núcleo ha sido templado. Debido a la fragilidad y al calibre fino del metal amorfo, se requiere un extremo cuidado y precisión para atar el material amorfo; mientras que el desempeño de las bobinas es idéntico al de los transformadores actuales de acero al silicio convencional, pues prácticamente no hay cambios en el diseño en los enrollados. El proceso de corte del material amorfo constituye, definitivamente, el mayor problema para los fabricantes.

La inversión asociada a la configuración de gaps distribuidos es relativamente pequeña, limitado al proceso de corte del metal amorfo, facilidad en la modificación del proceso de templado y plantillas de montaje especiales para la parte activa del transformador. El costo de manufacturación es levemente más alto que los diseños actuales con esta configuración.

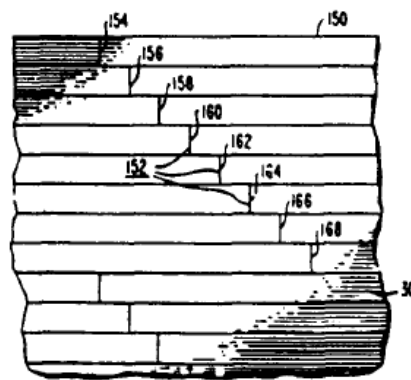
El transformador es construido inicialmente enrollando la cinta de metal amorfo dentro de un toroide (Figura 3.7 – (a)). Dado la flexibilidad del metal amorfo, es posible que el toroide colapse (Figura 3.7 – (b)), por lo que un número de laminaciones son levantados del toroide y son cortados siguiendo un patrón de junta de gaps escalonados (Figura 3.7 – (c)) [21].



(a)



(b)



(c)

Figura 3.7: (a) Vista isométrica de un toroide de metal amorfo, (b) Vista lateral de un toroide de metal amorfo, (c) Patrón de junta típico de un núcleo amorfo con gaps distribuidos.

Cuando el toroide cortado es reensamblado como núcleo, las laminaciones se empalman juntas. El diseño final con un núcleo amorfo se puede observar en la Figura 3.8. Nótese que las bobinas se montan en las dos piernas del núcleo, utilizando el espacio que se forma con la ventana rectangular central.

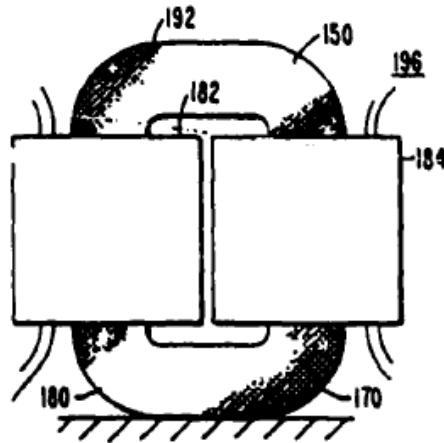


Figura 3.8: Configuración núcleo – bobina típico de diseño con gaps distribuidos de metal amorfo.

d) Núcleo con Junturas Traslapadas

Este concepto se diferencia del diseño de gaps distribuidos en los métodos de junta de las laminaciones y en la construcción misma del núcleo. En la configuración de juntas traslapadas, los paquetes de cintas se superponen unas con otras en vez de unirse en sus extremos. El núcleo se construye ensamblando varias cintas amorfas de igual longitud y sosteniéndose entre sí temporalmente. Cada paquete ensamblado se forma alrededor de un mandril rectangular; luego de que todos los paquetes son montados y sujetos, el conjunto pasa al proceso de templado. Posterior a esto, el núcleo es insertado en el conjunto de las bobinas.

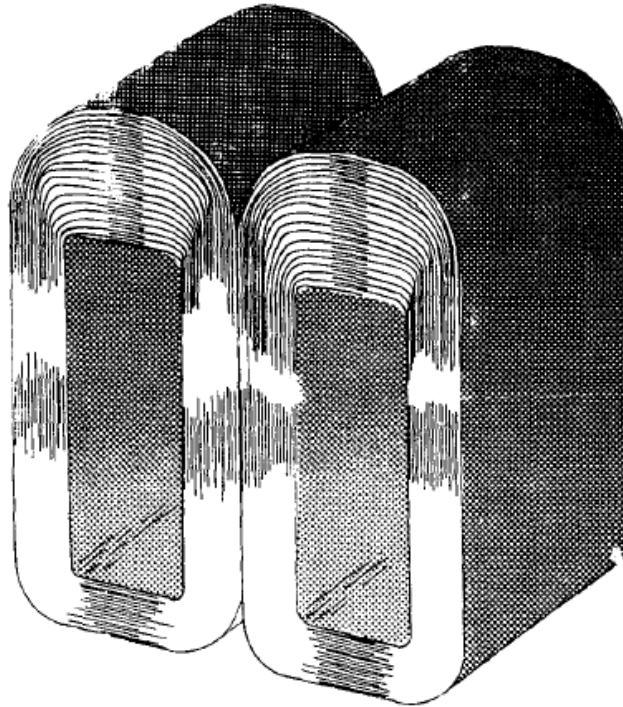


Figura 3.9: Diseño típico de núcleo con juntas traslapadas.

El funcionamiento del núcleo y de las bobinas debiese ser bueno, aunque se estima que el costo extra de material amorfo es de 5% con respecto al núcleo de gaps distribuidos (esto debido a la longitud adicional de cinta que es necesario para realizar el traslape entre los paquetes de láminas). Este traslape provoca también un incremento en la dimensión vertical del núcleo, lo que consecuentemente induce un aumento en el volumen del estanque y del líquido aislante.

Para fabricar un transformador con estas características se requiere el desarrollo de un método eficiente para cortar material amorfo y un método para apilar los paquetes cortados. Una ventaja de este diseño es que la tolerancia en la longitud de corte puede ser mucho mayor que en el caso de gaps distribuidos. Los costos de inversión (principalmente en equipamiento) son menores que en el caso de gaps distribuidos, siendo que la mano de obra en sí es esencialmente la misma.

El diseño utilizado comercialmente difiere del recientemente descrito, básicamente en que los gaps son distribuidos con tal de disminuir la acumulación de rebabas provocada por el apilamiento de las láminas. El núcleo se forma enrollando una cinta de material amorfo en un mandril, formando un toroide. Este

toroide es cortado, organizando una pila de láminas, y son reagrupadas produciendo paquetes, los cuales son anidados en otro mandril, de menor diámetro que el inicial. El núcleo que se obtiene es único debido a que se obtiene una dimensión de juntura traslapada variable y a la ausencia de láminas de poca longitud.

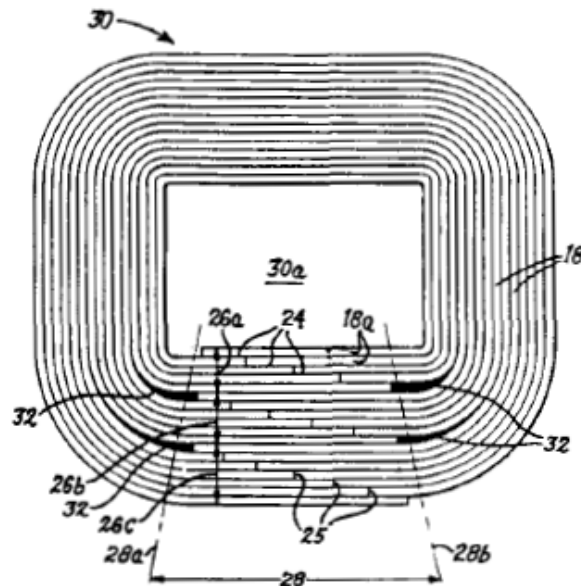


Figura 3.10: Detalle de núcleo con juntas traslapadas. Nótese los gaps de aire en el núcleo (32).

e) Núcleo Apilado

Un núcleo apilado (*stacked core*) se compone de varias capas de láminas planas. Cada capa consta de cuatro láminas planas que forman un marco de imagen rectangular (Figura 3.11). Las uniones en las cuatro esquinas pueden ser doble traslapadas (*double-lap joint*), traslapadas en los extremos de las capas (*butt-lap joint*) o mediante traslape con corte diagonal (*mitered joint*) (Figura 3.12).

Se considera que la junta tipo *butt-lap* es la más fácil de todas, pues solamente un extremo de la laminación necesita ser cortado en forma cuadrada. La junta tipo *double-lap* es la menos eficiente en cuanto al uso del material, debido al espacio utilizado con la superposición de láminas en los extremos. La experiencia con núcleos apilados de acero al silicio muestran que aquéllos con junta de corte diagonal tiene un desempeño 18% más eficiente que los tipo *butt-lap* [22]; sin embargo, esto puede no ser cierto en materiales amorfos.

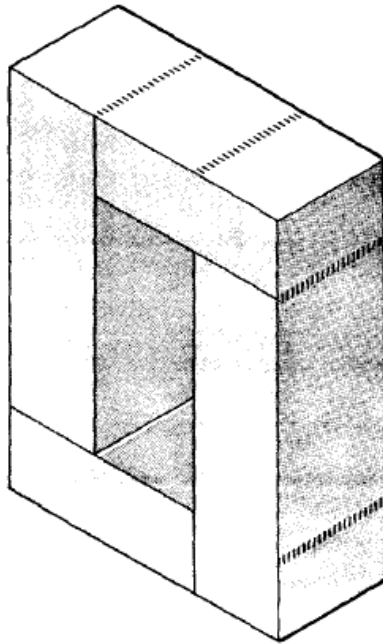


Figura 3.11: Diseño típico de núcleo apilado.

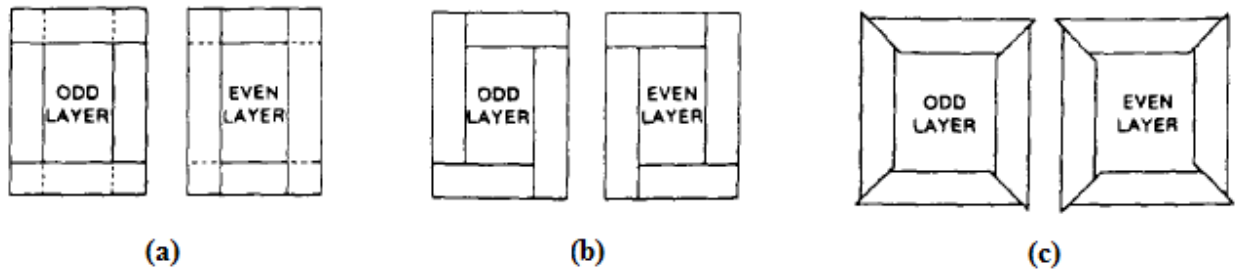


Figura 3.12: Junturas comunes utilizadas en núcleos apilados: (a) Juntura tipo *double-lap*, (b) Juntura tipo *butt-lap*, (c) Juntura con corte diagonal (tipo *mitered*).

El funcionamiento del núcleo y de las bobinas se espera que sea bueno. La configuración de las bobinas puede basarse en diseños preexistentes de enrollado, que han sido probados por muchos años. El principal reto lo representa el núcleo, dado que cada vuelta necesita cuatro cortes. Esto obliga al desarrollo de máquinas de cortes extremadamente eficientes y duraderos. Además, dado que existen cuatro juntas por capa, la potencia de excitación es mayor que los diseños de núcleo tipo enrollado (*wound core*) recientemente descritos.

Desarrollo de Programa de Cálculo de Parte Activa para Metal Amorfo

El programa de cálculo propuesto en el presente trabajo de memoria es válido para transformadores monofásicos líquidos de distribución, con núcleo tipo enrollado (wound core) de gaps distribuidos, sumergidos en aceite mineral, con enfriamiento natural, y bobinas rectangulares de cobre electrolítico.

La naturaleza propia del metal amorfo (comercialmente disponible en una limitadísima variedad de anchos, en forma de cinta difícil de cortar y troquelar, de bajo espesor, etc.) hace que su uso prioritario sea en núcleos tipo enrollados, por sobre otras disposiciones de diseño. Esto no quiere decir que no pueda utilizarse con otras configuraciones, pero sin dudas que, a nivel del fabricante en masa de transformadores, esta tecnología es la que preferentemente debiese utilizarse.

Las características y gráficos principales de la aleación amorfa comercialmente disponible (acero amorfo Metglas 2605SA1 y 2605HB1M) se detallan en la Tabla 3.3 [23] y en Anexo B. Notar que el grado 2605HB1M es evidentemente superior en cuanto a propiedades que el grado 2605SA1; sin embargo, el software de cálculo considera el “peor caso posible”, dado que se si se comprueba las bondades en este tipo de acero, evidentemente será válido para el restante.

Es importante notar algunos parámetros de relevancia; por ejemplo, se establecen valores de inducción y pérdidas del material, además de la inducción de saturación del metal amorfo (1,56 T para 2605SA1 y 1,63 T para 2605HB1M). Esto último indica que las simulaciones de diseño deben realizarse para valores de inducción menores a esas cifras. Asimismo, se indican los anchos disponibles de la aleación (142, 170 y 213 mm. para ambos casos) y el espesor de las láminas (25 μm). Por último, otro de los datos importantes es el factor de apilamiento: 84% como mínimo.

El resto de las propiedades del metal amorfo utilizadas en el programa de cálculo se desprenden de las curvas entregadas por el fabricante (Anexo B).

1. Alloys and the specification

Alloy		2605SA1	2605HB1M
Induction at 60 Hz and 80 A/m* (T)		≥1.35	≥1.50
Core Loss* (W/kg)	at 60 Hz and 1.3 T	≤0.17	≤0.17
	at 60 Hz and 1.4 T	≤0.20	≤0.20
Exciting Apparent Power* at 60 Hz and 1.4 T (VA/kg)		≤1.10	≤0.50

* These numbers in the above table are measured according to ASTM A 932/A 932 M - 01.

2. General Properties and Characteristics

Electromagnetic

Alloy	Saturation Induction (T)	Electrical Resistivity ($\mu\Omega\text{m}$)	Magnetostriction ($\times 10^{-6}$)	Curie Temperature ($^{\circ}\text{C}$)
2605SA1	1.56	1.3	27	395
2605HB1M	1.63	1.2	27	364

The numbers in the above table are not guaranteed

Physical

Alloy	Density (g/cm^3)	Crystallization Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Tensile Strength (N/mm^2)	Young's Modulus (GPa)	Vickers Hardness Hv-50 g load	Thermal Expansion Coefficient ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
						30 - 300 $^{\circ}\text{C}$
2605SA1	7.18	510	2,000	110	900	7.6
2605HB1M	7.33	489	2,100	120	900	4.3

The numbers in the above table are not guaranteed

3. Ribbon Dimensions and Lamination Factor

Alloy	Thickness (μm)	Standard Available Widths (mm)			Lamination Factor (%)
		142.2 ± 1.0	170.2 ± 1.1	213.4 ± 1.4	
2605SA1	25 ± 4	142.2 ± 1.0	170.2 ± 1.1	213.4 ± 1.4	≥84
2605HB1M					

Tabla 3.3: Tabla Resumen de características de aleación amorfa Metglas 2605SA1 y 2605HB1M. [23]

Es importante destacar que el software de cálculo de parte activa está programado para trabajar exclusivamente con transformadores monofásicos (esquema de la configuración utilizada se presenta en Figura 3.13). No obstante, la formulación utilizada puede extenderse para el caso de transformadores trifásicos (el más común en el mercado), mediante adecuaciones de las expresiones matemáticas, específicamente en cuanto a la geometría y dimensiones del núcleo y bobinas, la introducción de distintos tipos de conexiones (delta y estrella usualmente) y las cantidades de hierro y cobre por utilizar.

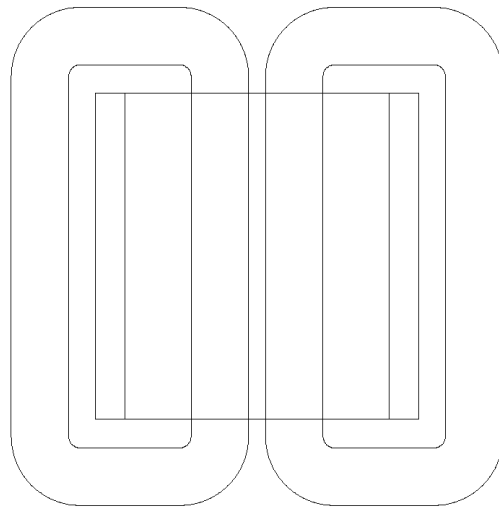


Figura 3.13: Esquema de núcleo enrollado monofásico típico (Parte Activa compuesta por dos núcleos y una bobina).

Es posible fabricar un transformador trifásico a partir de distintas variantes de unión de transformadores monofásicos. Los más usuales corresponden a la configuración tipo Evans (Figura 3.14 – a), donde se utiliza núcleos enrollados de tres piernas, y núcleos de cinco piernas (Figura 3.14 – b) [24]; se observa claramente que estas configuraciones se asemejan bastante a la esquematizada en la Figura 3.13.

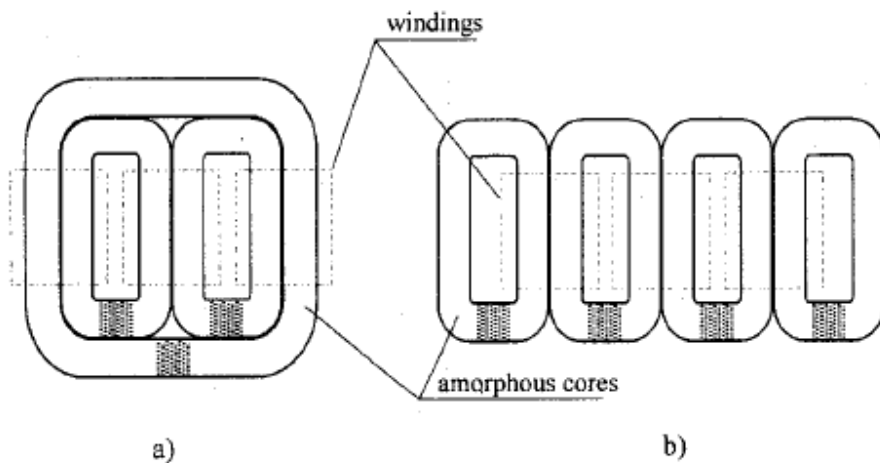


Figura 3.14: Esquema de transformadores trifásicos: (a) Tipo Evans, (b) Núcleo de 5 piernas. [24]

Por último, es importante mencionar que el programa de cálculo se basa en el diseño de la parte activa del transformador; esto es, la determinación de parámetros básicos del núcleo y las bobinas de alta y baja tensión, además de las características eléctricas y térmicas del equipo. Por lo tanto, ésta no entrega detalles específicos (de fabricación, por ejemplo) de grupos constructivos típicos del equipo, como lo son el estanque, la tapa, etc.

En particular, lo que revierte el principal interés es la determinación de los parámetros del núcleo (al modificar el material de acero al silicio de grano orientado hacia la aleación amorfa Metglas 2605SA1), pues la lógica matemática del cálculo de las bobinas se mantiene con respecto al caso estándar de acero convencional.

Metodología de Cómputo

El programa tiene como datos de entrada principales los siguientes datos:

- Potencia del transformador (en kVA)
- Frecuencia (en Hz)
- Temperatura de referencia (en °C)
- Elevación de temperatura máxima para aceite y enrollados (en °C)
- Voltajes en alta y baja tensión (en V)
- Tipo de líquido aislante
- Tipo de conexión
- Número de fases
- BIL en alta y baja tensión (en kV)
- Valores de garantía (para corriente de excitación, impedancia, pérdidas en el núcleo, pérdidas en el cobre, pérdidas totales)

En este último caso, los valores de garantía están incluidos en la base de datos del programa desarrollado, y son consecuentes con las normas de fabricación estándar (IEC, ANSI, etc.)

Las variables de iteración son principalmente las siguientes:

- Dimensiones del núcleo (mm) (ancho láminas, largo, ancho y alto del núcleo armado, altura ventana núcleo, etc.)
- Calibre y cantidad de conductores redondos de alta tensión (AWG; c/u)
- Calibre y cantidad de conductores rectangulares de baja tensión (mm×mm; c/u)
- Cantidad de espiras de baja tensión (c/u)
- Tipo de aislación en alta y baja tensión

El programa comienza variando la cantidad de espiras de baja tensión y las dimensiones del núcleo, de manera tal de conseguir una densidad de flujo “B” lo más cercana posible al valor típico de operación del metal amorfo Metglas 2605SA1; esto es, 1,35 Tesla.

La relación matemática fundamental que relaciona la densidad de flujo con las características dimensionales del núcleo y la frecuencia [25] se presenta en la ecuación (3.1):

$$B = \frac{VE \cdot 10^6}{444 \cdot F \cdot ST} \quad (3.1)$$

Donde: VE = tensión por espira en el enrollado de baja tensión (en V)
F = frecuencia (en Hz)
ST = sección transversal efectiva del núcleo amorfo (en mm²)

A partir de aquí, el programa se encarga de computar parámetros de interés del núcleo; en particular, el peso del mismo y relacionarlas con las pérdidas específicas del material (éstas últimas proporcionadas por el fabricante de la aleación amorfa).

Para el cálculo del peso, se realiza una estimación del volumen del núcleo, y dado que se conoce la densidad de la aleación amorfa, se encuentra la masa en kilogramos. Posteriormente, tras adecuar los gráficos de pérdidas proporcionados por el fabricante a valores aptos para el programa (los cuales habitualmente son entregados en Watts/kilogramo), se calculan las pérdidas en vacío del núcleo mediante la siguiente relación:

$$P_0 = P_{NUCLEO} \cdot PE(B) \cdot F_1(F) \cdot F_2(D) \quad (3.2)$$

Donde:

- P_0 = pérdidas en vacío del núcleo amorfo (en W)
- P_{NUCLEO} = peso del núcleo (en kg)
- $PE(B)$ = pérdidas específicas del material, dependiente de la inducción (en W/kg)
- $F_1(F)$ = factor empírico, dependiente de la frecuencia
- $F_2(D)$ = factor empírico, dependiente de las dimensiones del núcleo

Habiendo determinado los parámetros principales del núcleo, el software se encarga de computar los valores de importancia para el enrollado de baja y alta tensión. En este caso, es importante destacar que existe una cantidad finita de opciones para iteración; en particular, para el calibre y cantidad de conductores y tipo de aislación en los devanados BT y AT.

Los valores de salida del software corresponden a los parámetros de interés en el diseño del equipo; a continuación se enuncian los más importantes:

- Corrientes en el enrollado de baja/alta tensión (en A)
- Cantidad de espiras según taps, y error asociado
- Elevación de temperatura calculado para el aceite y los enrollados (en °C)
- Pérdidas en vacío, en el cobre y totales (en W)
- Corriente de excitación
- Impedancia (en %)
- Distancias internas del transformador (en mm) (distancia entre fases, entre núcleo y enrollado BT, entre enrollado BT y AT, etc.)
- Pesos principales involucrados en la fabricación del equipo (en kg)
- Costos principales involucrados en la fabricación del equipo (en US\$)

Los resultados que se obtienen deben compararse con los valores garantizados con anterioridad: si es que se cumplen, teóricamente el diseño del equipo puede darse por aprobado; de lo contrario, se debe repetir el proceso de iteración hasta satisfacer cabalmente con los requerimientos normativos, del cliente, de costo mínimo, etc.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO CON NÚCLEO AMORFO

Simulaciones con Software de Cálculo de Parte Activa para Metal Amorfo

Con el fin de comprobar las bondades del programa de cálculo recientemente explicado, se procede a realizar simulaciones de diseño de equipos monofásicos.

En el presente caso, se seleccionan dos ejemplos de experimentación (descritos como “Simulación 1” y “Simulación 2”), los que corresponden a la mejor representación posible de dos equipos previamente diseñados, fabricados y probados, con núcleo de acero al silicio convencional de grano orientado. La idea de este procedimiento es poder posteriormente comparar un equipo lo más idéntico posible con otro, diferenciándose solamente en el material utilizado para la confección del circuito magnético.

A continuación se presentan las características generales de los equipos diseñados:

	Simulación 1	Simulación 2
Potencia (kVA)	15	25
Fases	1	1
Tensión AT (V)	23000	13200
Tensión BT (V)	231	231
Frecuencia (Hz)	50	50
Clase de Aislación (kV)	25 (125 BIL)	15 (95 BIL)
Elevación Temperatura Aceite (°C)	60	60
Elevación Temperatura Enrollados (°C)	65	65
Tipo de Refrigeración	Sumergido en aceite, con enfriamiento natural	Sumergido en aceite, con enfriamiento natural
Norma	IEC-ANSI	IEC-ANSI
Altura de operación (m)	1000	1000

Tabla 4.1: Características generales de los equipos simulados para el caso de metal amorfo.

Dado que las principales propuestas en el programa están asociadas al cálculo del núcleo, se detallan en Tabla 4.2 los parámetros fundamentales de éste:

	Simulación 1	Simulación 2
Material magnético del Núcleo	Acero amorfo Metglas 2605SA01	Acero amorfo Metglas 2605SA01
Densidad de Flujo B (T) (operación)	1,35	1,35
Densidad de Flujo B (T) (saturación)	1,56	1,56
Factor de Apilamiento	0,85	0,85
Espesor lámina (mm)	0,025	0,025
Densidad acero amorfo (g/cm ³)	7,18	7,18
Ancho lámina (mm)	142	170
Ancho pierna núcleo (mm)	51	56

Tabla 4.2: Parámetros principales de los núcleos diseñados para Simulación 1 y 2.

Resultados Obtenidos

A continuación se presentan los resultados obtenidos con el programa para el transformador de 15 kVA y 25 kVA, respectivamente:

Simulación 1	Transformador con núcleo acero al silicio GO	Transformador con núcleo acero amorfo
Pérdidas en Vacío (W)	74	13
Pérdidas en el Cobre (W)	319	357
Pérdidas Totales (W)	393	370
Impedancia (%)	3,94	4,03
Corriente de Excitación (%)	1,25	0,17
Peso núcleo (kg)	53,2	76,5

Densidad de Flujo (T) (operación)	1,79	1,35
Costo Núcleo (US\$)	157	315,7
Costo Total Transformador (US\$)	820	1005
Dimensiones estanque (mm)		
Diámetro	360	360
Alto	590	660

Tabla 4.3: Resultados principales para transformador de 15 kVA, con acero al silicio y acero amorfo (Simulación 1).

Simulación 2	Transformador con núcleo acero al silicio GO	Transformador con núcleo acero amorfo
Pérdidas en Vacío (W)	87	18
Pérdidas en el Cobre (W)	491	541
Pérdidas Totales (W)	578	559
Impedancia (%)	4,07	4,10
Corriente de Excitación (%)	0,63	0,14
Peso núcleo (kg)	79,6	108,3
Densidad de Flujo (T) (operación)	1,67	1,35
Costo Núcleo (US\$)	235	447
Costo Total Transformador (US\$)	1089	1353
Dimensiones estanque (mm)		
Diámetro	350	370
Alto	600	670

Tabla 4.4: Resultados principales para transformador de 25 kVA, con acero al silicio y acero amorfo (Simulación 2).

Los valores para el transformador con acero convencional son datos conocidos con anterioridad; mientras que los del acero amorfo son calculados y/o estimados por el programa. El costo del material

amorfo se valoró con un porcentaje de 40% de aumento por sobre el del acero de grano orientado; este precio se adopta según lo observado en diversas fuentes de literatura y mediante cotizaciones directas hechas con proveedores del acero [26].

Análisis de Resultados

Es de interés remarcar, primeramente, que ambas simulaciones para los casos amorfos cumplen cabalmente con los estándares mínimos de diseño que sugieren reconocidas normas como IEC o ANSI; en particular a lo referente a los valores garantizados o tolerancias de variables como la impedancia, corriente de excitación, pérdidas en vacío y totales, error en razón de transformación, etc.

En el caso de la “Simulación 1”, se observa que las pérdidas sin carga del diseño con núcleo amorfo corresponden a aproximadamente el 18% de las calculadas para el acero al silicio. Esto confirma los antecedentes sobre las bajas pérdidas en vacío del material amorfo por sobre el acero convencional, los cuales se deben indudablemente a las propiedades ventajosas que posee intrínsecamente la aleación. En tanto, las pérdidas con carga son ligeramente más altas en el caso amorfo (alrededor de 10%); la explicación radica en que, dado que la sección del núcleo amorfo es más grande que la del núcleo al silicio, consecuentemente los devanados de baja y alta tensión (que se enrollan concéntricamente alrededor del núcleo) fabrilmente tendrán perímetros mayores, lo que implica mayor cantidad de conductor. Esto último se traduce en mayores pérdidas resistivas, más kilogramos de cobre y un leve aumento en las dimensiones finales del transformador.

No obstante, las pérdidas totales del equipo amorfo son menores que los del acero al silicio, en un porcentaje cercano al 6% (para el transformador a plena carga); los bajísimos valores de las pérdidas en vacío compensan el leve aumento de las pérdidas en el cobre.

Para el análisis anterior es importante considerar que las pérdidas del cobre calculadas se encuentran en correspondencia con un factor de carga del transformador de 100%. Por lo tanto, para otros factores de carga típicos (75%, 50%, 25%), las pérdidas en el cobre van a ser consecuentemente menores, haciendo que la diferencia existente entre las pérdidas en el cobre del acero amorfo y del acero convencional sea cada vez más pequeña, a medida que decrece el factor de carga.

Otro parámetro importante de evaluar es la corriente de excitación; claramente se observa un descenso en la corriente de excitación en el caso amorfo. Esta diferencia es especialmente evidente para transformadores de bajas potencias, donde la corriente de excitación es porcentualmente alta en comparación a equipos de potencias mayores. En este caso, el descenso es de 85% aproximadamente con respecto al caso convencional.

Esta cualidad es claramente ventajosa; indica que se necesita una menor corriente para provocar la generación del mínimo flujo magnético en el núcleo, que permita la transformación a las tensiones (corrientes) deseadas. Además, al tener un valor tan bajo, permite disminuir las pérdidas reactivas del equipo, y acercarse a un factor de potencia casi ideal.

En cuanto a la densidad de flujo, es claro notar que en el caso amorfo está limitado a un valor de operación relativamente bajo. Esto obedece a que el punto de saturación del material es más bajo que el del acero convencional. La consecuencia directa de esto es que es necesaria mayor cantidad de material para que fluya esta densidad y no otra mayor.

El efecto negativo es incuestionable: mayor cantidad de material implica mayores costos, tanto directos como indirectos. El uso de un núcleo con sección efectiva más grande conlleva una inversión mayor en dicho material, pero indirectamente también en otros: al aumentar la sección del núcleo, aumentan las cantidades y dimensiones de los conductores de los enrollados, del material aislante, del estanque que cobija la parte activa, y del líquido aislante que lo refrigera.

Se observan diferencias de 35% entre el peso del núcleo en uno y otro caso. Si a este hecho se le agrega que el precio por kg de la aleación amorfa es 40% mayor que el acero al silicio, entonces el costo del núcleo amorfo llega a casi doblar el costo del acero convencional. Este punto constituye la principal razón que explica la diferencia de costos totales entre un equipo y otro (20% aproximadamente).

El aumento en el volumen del núcleo amorfo se traduce también en un incremento del volumen del estanque del transformador. Esto se explica porque, al margen de cómo sea físicamente el núcleo, se deben mantener ciertas distancias mínimas entre la parte activa y las paredes interiores del estanque. Si por ejemplo aumentase el largo del núcleo, también lo hará el largo del estanque (o diámetro en este

caso, ya que se supone un estanque cilíndrico). En este caso, el aumento del volumen total es de casi 12%.

Ahora bien, el caso presentado en la “Simulación 2” de cierta manera confirma lo detallado recientemente. Para el diseño con núcleo amorfo se presentan mejoras sustanciales en cuanto a las pérdidas en vacío y totales del equipo (descenso del 79% y 4% respectivamente, con respecto al caso convencional); y leves alzas de las pérdidas a plena carga (10%).

Dada la proporcionalidad inversa existente entre la potencia del equipo y la corriente de excitación, obviamente este parámetro se vuelve menos sensible cuando la potencia aumenta. En esta simulación de transformador de 25 kVA, las diferencias son menores que las obtenidas con el transformador de 15 kVA. La reducción de la corriente de excitación en porcentaje es de 0,63 a 0,14 (77% aproximadamente). Dada la naturaleza de la aleación amorfa, para potencias mayores las diferencias deberían minimizarse, hasta volverse comparativamente favorables para el acero convencional.

En el diseño amorfo, el aumento del peso del núcleo es del orden del 35%, y el costo del mismo llega a más del 90% que el costo del acero convencional. Consecuentemente, la diferencia de los costos totales entre ambos equipos ronda el 23%; mientras que el aumento de volumen del estanque del diseño amorfo es de 20%.

En definitiva, ambas simulaciones muestran coherencia en cuanto a las ventajas y desventajas del diseño amorfo con respecto al acero convencional de grano orientado, en el plano netamente técnico de un transformador monofásico de distribución. Un último análisis se debe realizar antes de concluir: el aspecto económico del transformador, basado en herramientas tradicionales de evaluación económica para este tipo de equipos.

Evaluación Económica de los Diseños Simulados

Dentro de la literatura se pueden encontrar varias formulaciones de evaluación económica de un transformador, pero sin duda la más habitual y a la vez completa corresponde al concepto del TOC (*Total Owning Cost*, acrónimo en inglés de “Costo Total del Propietario”).

El TOC constituye un método mediante el cual se puede especificar el rendimiento del transformador en términos de rentabilidad económica, considerando patrones de carga del transformador, costos de la energía, tasas de interés, entre otros factores. La meta primordial es obtener la mejor combinación entre el costo inicial del transformador y su costo de operación, considerando el tiempo de vida útil del equipo (20 – 25 años).

La formulación básica del TOC es la siguiente:

$$TOC = CI + \{k_1 \cdot P_0 + k_2 \cdot P_{CU}\} \quad (4.1)$$

Donde:

- CI = costo inicial total del transformador (US\$)
- k_1 = factor de evaluación de las pérdidas en vacío (US\$/W)
- P_0 = pérdidas en vacío del transformador (W)
- k_2 = factor de evaluación de las pérdidas en carga (US\$/W)
- P_{CU} = pérdidas en carga del transformador (W)

De los parámetros recién especificados, los valores de costo inicial, pérdidas en vacío y pérdidas en carga pueden ser extraídos directamente de las simulaciones realizadas con el programa de cálculo; mientras que los parámetros “ k_1 ” y “ k_2 ” deben ser estimados a partir de otras fuentes.

En general, la valoración de estos factores no es de fácil deducción, y mucho menos aplicable a distintas realidades socioeconómicas; dependen fuertemente del tipo de mercado, de la aplicación que se le quiera dar al transformador e incluso de las condiciones del país donde se quiera aplicar este método.

Los valores de los factores de evaluación de pérdidas varían dependiendo de los costos de la energía y del factor de carga al que sea sometido el transformador. Dado que las pérdidas en el cobre están en función del cuadrado de la carga en p.u., la valoración de pérdidas en vacío es normalmente más alta que la de las pérdidas con carga.

Lo anterior se explica por el hecho de que las pérdidas en vacío están presentes en todo momento (siempre y cuando el transformador esté energizado), mientras que las pérdidas con carga son dependientes directamente del factor de carga del equipo. Por ende, la valoración que realizan las industrias penaliza en mayor grado las pérdidas del hierro y en menor medida las pérdidas en el cobre.

La valorización de las pérdidas que se puede encontrar en la literatura toma estos puntos como preceptos esenciales.

A modo de ejemplificación, para efectos de este documento, se consideran dos fuentes principales: la primera de ellas, una estimación de proporcionalidad entre “ k_1 ” y “ k_2 ” obtenida del sitio web del principal proveedor del acero amorfo grado 2605SA1 [27]; y la segunda, proveniente de estudios liderados por ingenieros mexicanos [28].

Es importante notar que, al margen del tipo de material que se utilice para el núcleo, la valoración de los factores k_1 y k_2 es idéntica para el caso amorfo como para el acero convencional. Esto tiene coherencia, pues las empresas necesitan realizar comparaciones con respecto a las bondades de uno y otro caso, evaluándolos bajo un mismo prisma (en este caso, con una misma valoración de pérdidas).

Aplicación del TOC

La validación del *TOC* se realiza mediante dos simulaciones simples, donde los datos de entrada corresponden a los parámetros de diseños de acero amorfo y acero al silicio expuestos en la sección anterior.

Estos dos ensayos (denominados “Evaluación Económica 1” y “Evaluación Económica 2”), fijan los siguientes valores para k_1 y k_2 :

	k_1 (US\$/W)	k_2 (US\$/W)
Evaluación Económica 1	4	0,4624
Evaluación Económica 2	8,16	4,02

Tabla 4.5: Resumen de los dos casos posibles de valoración de pérdidas [27] [28]

Los resultados de “Evaluación Económica 1” para el diseño con núcleo de acero convencional y acero amorfo, para el caso del transformador a plena carga de 15 kVA (“Simulación 1”) y transformador a plena de carga de 25 kVA (“Simulación 2”), se detallan en Tabla 4.6 y 4.7 respectivamente:

Simulación 1	Transformador con núcleo acero al silicio GO	Transformador con núcleo acero amorfo
Costo Inicial (US\$)	820	1005
Pérdidas en Vacío (W)	74	13
Pérdidas en Carga (W)	319	357
Valoración pérdidas en vacío (US\$/W)	296	52
Valoración pérdidas en carga (US\$/W)	148	165
TOC (US\$)	1264	1222

Tabla 4.6: Cálculo del TOC para transformador de 15 kVA (caso acero al silicio y acero amorfo), con un factor $k_1=4$ y $k_2=0,4624$.

Simulación 2	Transformador con núcleo acero al silicio GO	Transformador con núcleo acero amorfo
Costo Inicial (US\$)	1089	1353
Pérdidas en Vacío (W)	87	18
Pérdidas en Carga (W)	491	559
Valoración pérdidas en vacío (US\$/W)	348	72
Valoración pérdidas en carga (US\$/W)	227	258
TOC (US\$)	1664	1683

Tabla 4.7: Cálculo del TOC para transformador de 25 kVA (caso acero al silicio y acero amorfo), con un factor $k_1=4$ y $k_2=0,4624$.

De igual manera, se detallan los resultados de aplicar la “Evaluación Económica 2” para el diseño con núcleo de acero convencional y acero amorfo, para el caso del transformador a plena carga de 15 kVA (“Simulación 1”) y transformador a plena carga de 25 kVA (“Simulación 2”) en Tablas 4.8 y 4.9 respectivamente:

Simulación 1	Transformador con núcleo acero al silicio GO	Transformador con núcleo acero amorfo
Costo Inicial (US\$)	820	1005
Pérdidas en Vacío (W)	74	13
Pérdidas en Carga (W)	319	357
Valoración pérdidas en vacío (US\$/W)	604	106
Valoración pérdidas en carga (US\$/W)	1282	1435
TOC (US\$)	2706	2546

Tabla 4.8: Cálculo del TOC para transformador de 15 kVA (caso acero al silicio y acero amorfo), con un factor $k_1=8,16$ y $k_2=4,02$.

Simulación 2	Transformador con núcleo acero al silicio GO	Transformador con núcleo acero amorfo
Costo Inicial (US\$)	1089	1353
Pérdidas en Vacío (W)	87	18
Pérdidas en Carga (W)	491	559
Valoración pérdidas en vacío (US\$/W)	710	147
Valoración pérdidas en carga (US\$/W)	1974	2247
TOC (US\$)	3773	3747

Tabla 4.9: Cálculo del TOC para transformador de 25 kVA (caso acero al silicio y acero amorfo), con un factor $k_1=8,16$ y $k_2=4,02$.

En la Tabla 4.10 se muestra el porcentaje de disminución o aumento del costo evaluado de los diseños amorfos, con respecto a los diseños de acero convencional, para las cuatro pruebas:

	Simulación 1	Simulación 2
Evaluación Económica 1	-3,323%	+1,142%
Evaluación Económica 2	-5,913%	-0,689%

Tabla 4.10: Porcentaje de disminución o aumento del costo evaluado de diseños amorfos con respecto al diseño de acero convencional.

En tres de los cuatro casos posibles, se observa que el costo evaluado del diseño amorfo es menor que el diseño del acero convencional; mientras que en sólo uno la configuración de acero al silicio resulta más conveniente que el diseño amorfo, denotado por el porcentaje positivo de Tabla 4.10.

Los buenos resultados de los TOC amorfos se explican por la baja valoración relativa que tiene el término " $k_1 \cdot P_0$ " (valoración económica de pérdidas en vacío) con respecto al total. Esto se debe inevitablemente al bajo valor de las pérdidas de los transformadores diseñados con acero amorfo en comparación a cualquier otro material. Este efecto se mantiene para equipos de potencias mayores.

Además, se observa que un factor preponderante en la evaluación es el costo inicial del equipo; por lo tanto, si los precios del acero amorfo llegasen a bajar (situación que la literatura relacionada prevé, dada la masificación mundial de esta materia prima y el mayor interés en tecnologías más amigables con el medioambiente, además de existir cierta escasez en los mercados de acero de grano orientado [29]), entonces el TOC para los diseños amorfos van a ser evidentemente aún más favorables.

Para el caso donde el TOC del diseño convencional es superior al de su par amorfo se explica porque en este caso el costo inicial del equipo es demasiado alto (representa el 80% del TOC final), por lo que, por muy ventajosas que sean las cualidades de pérdidas, no alcanzan para cubrir la fuerte inversión inicial.

Incidencia del Factor de Carga del Transformador

Es bien sabido que los fabricantes suelen entregar los valores de pérdidas en el cobre en la condición de “plena carga”. No obstante, existen variadísimas aplicaciones que tienen o consideran un factor de carga menor al 100%; por ejemplo, es el caso de transformadores con servicio no continuo.

Consecuentemente, un transformador bajo estas características puede y debe ser evaluado económicamente. La formulación del TOC considera un factor de carga igual a uno, por lo que se debe adecuar la ecuación (23) a esta nueva variable.

Las pérdidas en el cobre pueden formularse como sigue [1]:

$$P_{Cu} = P_{Cu}(100\%) \cdot \left(\frac{FC}{100}\right)^2 \quad (4.2)$$

Donde: P_{Cu} = pérdidas en el cobre (para cualquier factor de carga) (en W)
 $P_{Cu}(100\%)$ = pérdidas en el cobre a plena carga (en W)
FC = factor de carga del transformador (en %)

De esta manera, el TOC generalizado para cualquier factor de carga es el siguiente:

$$TOC = CI + \left\{ k_1 \cdot P_0 + k_2 \cdot P_{Cu}(100\%) \cdot \left(\frac{FC}{100}\right)^2 \right\} \quad (4.3)$$

Al aplicar la ecuación anterior a los cuatro casos de simulación ya largamente tratados, se obtienen las siguientes series de resultados (se consideran 5 factores de carga relevantes; 0%, 25%, 50%, 75% y 100%):

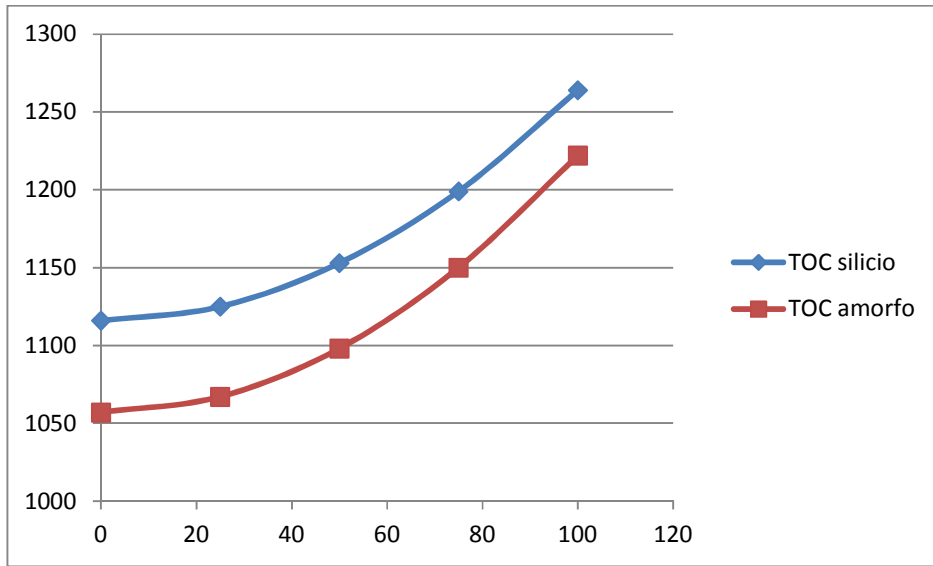


Figura 4.1: Curvas TOC para acero al silicio y amorfo para distintos factores de carga (Transformador 15 kVA, con un factor $k_1=4$ y $k_2=0,4624$).

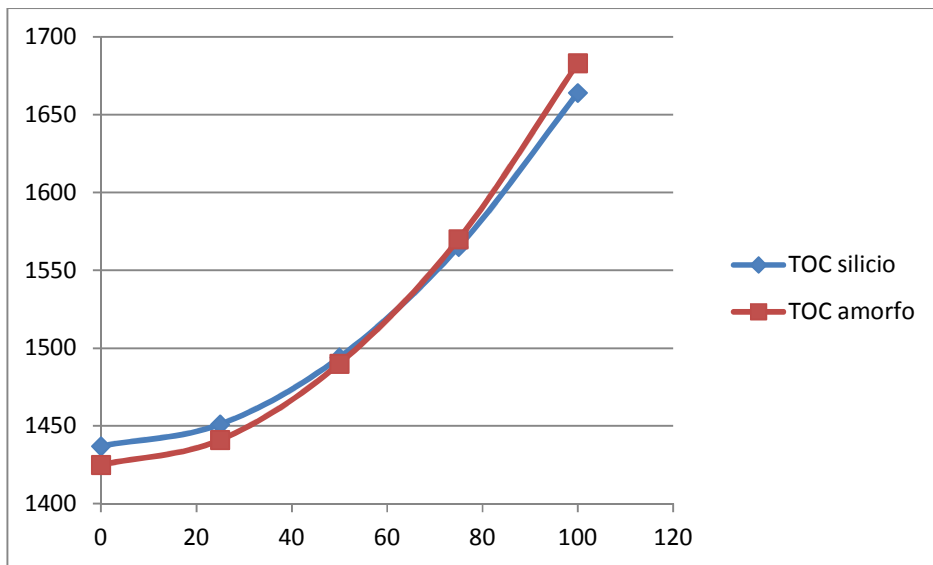


Figura 4.2: Curvas TOC para acero al silicio y amorfo para distintos factores de carga (Transformador 25 kVA, con un factor $k_1=4$ y $k_2=0,4624$).

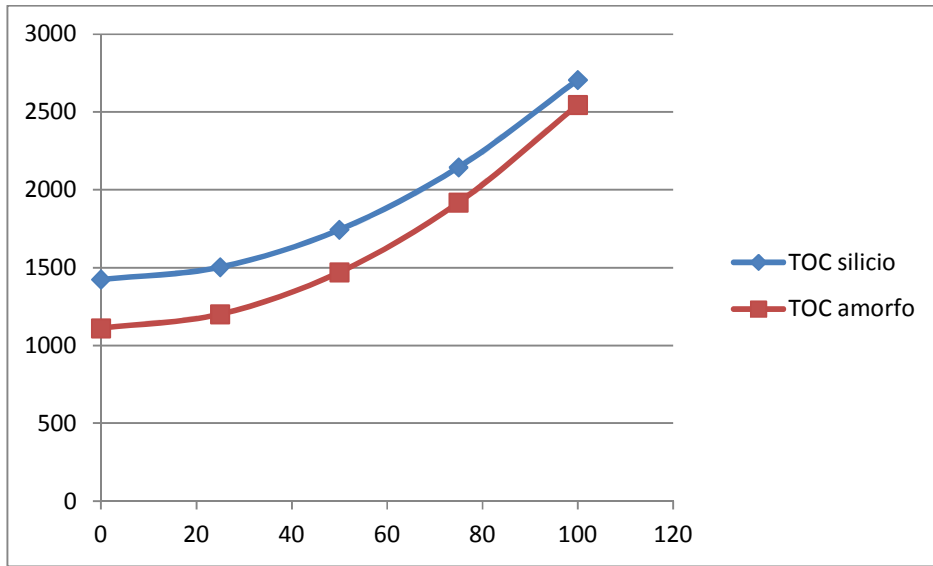


Figura 4.3: Curvas TOC para acero al silicio y amorfo para distintos factores de carga (Transformador 15 kVA, con un factor $k_1=8,16$ y $k_2=4,02$).

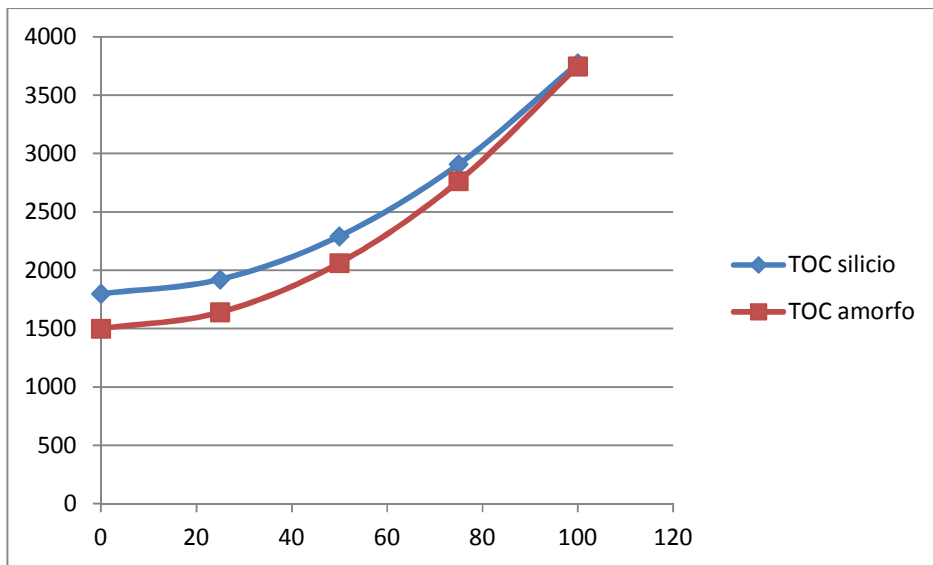


Figura 4.4: Curvas TOC para acero al silicio y amorfo para distintos factores de carga (Transformador 25 kVA, con un factor $k_1=8,16$ y $k_2=4,02$).

Se observa de los gráficos anteriores que, a medida que se experimenta un menor factor de carga, el TOC de los diseños amorfos disminuye notablemente, aumentando las diferencias con respecto a los TOC de los diseños de acero convencional.

Como las pérdidas en el cobre aumentan a razón del cuadrado del factor de carga, entonces la valoración de dichas pérdidas tenderá a cero, cuando $FC \rightarrow 0$. En ese caso extremo, además del costo inicial será incluso más importante la valoración de las pérdidas en vacío, las que se sabe que son extremadamente bajas en el caso del acero amorfo.

La conveniencia del acero amorfo para el caso del transformador de 15 kVA es incuestionable, para ambos tipos de evaluación económica (Figuras 4.1 y 4.3), donde para todo el abanico de factores de carga el TOC amorfo es más conveniente que el del acero al silicio.

Mientras tanto, para el transformador de 25 kVA (Figuras 4.2 y 4.4), la conveniencia del diseño amorfo se presenta particularmente para factores de carga cercanos al 75% y menores; en cambio, para factores de carga del orden de 90 a 110%, las diferencias se estrechan, volviéndose levemente conveniente la propuesta de acero convencional.

La razón principal de esta situación es el alto precio de la aleación amorfa, el cual limita las bondades que ofrece en cuanto a bajas pérdidas; además de que la ponderación de " P_{CU} " se torna más predominante a medida que aumenta la carga (resultado evidente, dada la proporcionalidad directa existente entre ambos).

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Conclusiones Generales

Las propiedades ferromagnéticas de los metales amorfos (detallas con largueza en el transcurso de este documento), presentan una oportunidad inmejorable para reducir en forma significativa las pérdidas en vacío de los transformadores de distribución.

Debido al alto énfasis y valor que en el presente se le ha otorgado a la conservación de la energía, la aplicación de las aleaciones amorfas en transformadores puede dar como resultado costos totales reducidos para el usuario. No obstante, el éxito de esta tecnología depende de la interacción profunda de tres factores fundamentales: el valor relativo de la energía, el costo y ejecución del material, y diseños económicamente factibles de fabricar.

Existen algunas conclusiones que se derivan tanto de la literatura existente, así como del programa de cálculo de parte activa para acero amorfo. La más notable es, sin duda alguna, la ostensible reducción de las pérdidas del fierro con respecto a los núcleos convencionales de acero al silicio de grano orientado.

Las pérdidas en vacío obtenidas en las simulaciones para los transformadores amorfos de 15 y 25 kVA concuerdan con lo especificado en catálogos de fabricantes de transformadores [30] y también con investigaciones recabadas de diversos papers [22], por lo que la estimación de las pérdidas puede definirse con bases sólidas como muy aceptables y cercanas a la realidad.

Esta disminución de pérdidas en las aleaciones amorfas es del orden del 70% – 80% del acero convencional de grano orientado, lo que se traduce (para factores de carga del transformador de un 50% aproximadamente) en una reducción total de pérdidas del orden del 20% - 25% para transformadores de distribución de bajas potencias.

Asimismo, la valoración de pérdidas específicas del material, obtenidas de los gráficos del datasheet de Metglas, concuerdan con lo especificado por diversas fuentes de la literatura (muchas de ellas citadas en este documento) y utilizadas adecuadamente en el programa de cálculo de parte activa.

Resultados beneficiosos se encuentran también para el caso de la corriente de excitación, donde el caso amorfo es claramente menor que cualquier otro acero de uso tradicional. Tanto la literatura revisada así como las simulaciones realizadas indican que la disminución de la corriente de excitación por concepto de utilización de la aleación amorfa es del 50% a 85%, dependiendo del caso.

La permeabilidad de la aleación amorfa es bastante buena para inducciones hasta 1,4 [T]; para inducciones mayores esa cualidad se ve deteriorada rápidamente. Las fuentes consultadas hacen especial hincapié en este tema, dado que una baja inducción se traduce en una mayor sección efectiva del núcleo (y por ende, mayor cantidad de material, mayor peso y mayores costos directos e indirectos del transformador). Los resultados de las simulaciones especificadas en el Capítulo 4 toman como criterio este punto de operación de inducción; consecuentemente, es natural observar que volumétricamente el núcleo amorfo es mayor a su par de acero al silicio.

La explicación a lo anterior es que el material amorfo tiene un punto de saturación bastante más bajo comparado al acero tradicional, por lo que las inducciones reales de operación se ajustan a aproximadamente al 85% de la inducción de saturación. Como en el acero amorfo grado 2605SA1 la saturación es de 1,56 (T), entonces la inducción de operación estándar es de 1,35 (T).

Los avances en la calidad de este material han permitido producir aceros con mayores puntos de saturación, lo que consiguientemente permite configurar los transformadores a mayores inducciones de operación. De esta manera, el tamaño del núcleo amorfo resultante se asimila bastante al tamaño de los núcleos fabricados con acero al silicio, pero con mejores características de pérdidas y excitación [10].

La confiabilidad del acero amorfo en el largo plazo está plenamente garantizada; esto está avalado por diversos estudios asociados a este tema, los que detallan el set de pruebas que se le realiza al material para obtener la vida útil de éste y la variación de distintos parámetros de interés (cambio en las pérdidas en vacío, pérdidas en carga, impedancia, nivel de ruido, etc.).

Se ha determinado fehacientemente que la aleación Metglas 2605SA1 posee un tiempo de vida útil del orden de 7100 años; mientras que la aleación 2605HB1M alcanza los 600 años [31]. En cualquiera de los casos, este tiempo de vida útil excede notablemente el del transformador (20 – 30 años). Asimismo, la variación de las pérdidas en vacío no tiene mayor relación con el factor de carga del transformador [32].

Los atributos y características únicas que ofrece el metal amorfo, tales como espesor, flexibilidad, dureza, etc. realzan la técnica de diseño de núcleo enrollado sin junta, por sobre otras configuraciones algo más tradicionales como lo son los núcleos apilados o núcleos bobinados con junta.

La elección de este tipo de diseño se justifica en el hecho de que las cintas amorfas comercialmente disponibles ofrecen un rango restringido de anchos de láminas (sólo 3 medidas posibles), teniendo como consecuencia que su uso, en términos generales, esté limitado sólo a potencias relativamente bajas. Dada la dureza y flexibilidad de la aleación amorfa, es natural pensar en realizar la menor cantidad de cortes al material, puesto que esta tarea es en extremo compleja para el metal amorfo. El diseño que mejor se adapta a las características del material es sin duda el núcleo tipo enrollado, donde el ancho de las láminas no sufre variaciones (a diferencia de otras configuraciones habituales).

No obstante, con esto no se está concluyendo que el metal amorfo es aplicable solamente a los núcleos bobinados, sino que constituye una forma factible (técnica y económicamente) de diseño.

Ahora bien, con respecto al tema económico, es importante realizar consideraciones sobre dos temas esenciales. En el primero, asociado al costo inicial del equipo (el que considera el costo de los materiales básicos, costo de accesorios estándar, costo de la mano de obra de fabricación, etc.), el transformador cuyo núcleo es fabricado con metal amorfo es más caro que uno con núcleo fabricado con acero al silicio de grano orientado, siendo prácticamente idénticos en cuanto a características eléctricas, diferenciándose exclusivamente en el tipo de material magnético. Esto se debe a que obviamente el costo de la aleación amorfa es mayor que el acero convencional (30% – 40% aproximadamente); lo que induce alzas de costos en otros elementos del transformador (estanque, líquido aislante, etc.). Sin embargo, y según antecedentes recabados, los precios de la aleación amorfa han tendido a disminuir al paso de los años, por lo que no es descabellado proyectar costos totales similares entre ambas alternativas [6].

El segundo tema de importancia es la valorización real de un transformador mediante la herramienta del Costo Total del Propietario (TOC). Este método converge adecuadamente el costo de inversión inicial del transformador con la operación del mismo durante su ciclo de vida útil. Este último se establece a partir de la valorización de pérdidas totales del equipo, subdivididas en pérdidas en vacío y con carga. Tras una serie de simulaciones, se establece que el valor del TOC para equipos amorfos es prácticamente igual o menor en todos los casos que los equipos con acero al silicio. Esto se explica por

la diferencia abismante entre las pérdidas en vacío en uno y otro caso; tan importante llega a ser este factor, que compensa totalmente las diferencias existentes entre los costos iniciales de cada transformador.

Lo anterior se vuelve aún más marcado cuando el factor de carga del equipo disminuye, dado que en esa situación las pérdidas en el cobre son cada vez menos preponderantes; por lo que el metal amorfo se convierte en una alternativa aún mejor que cuando se opera el equipo a plena carga. Por lo tanto, conocer el factor de carga del transformador puede ser determinante para la elección de una u otra alternativa de diseño.

A pesar del éxito en la aplicación del metal amorfo en los transformadores de distribución monofásicos y trifásicos, la penetración del material en dicha aplicación a nivel mundial ha sido relativamente lenta. Las razones que explican el lento desarrollo son el alto costo previsto de fabricación, la dificultad para cortar, apilar y troquelar la cinta de 0,025 mm de espesor, bajo factor de apilamiento comparado con el acero al silicio, etc.

En términos del fabricante de transformadores, todavía existen impedimentos o problemas evidentes para aplicar esta tecnología con masividad. Por ejemplo, la aleación amorfa opera a inducciones bajas comparadas con el acero tradicional, lo que se traduce en cantidades mayores de material. Asimismo, se presentan limitaciones del diseño magnético, dado que los anchos de láminas disponibles son sumamente restringidos, lo que circunscribe su uso a ciertas potencias o ciertos diseños; otras desventajas son la fragilidad intrínseca del metal y la baja resistencia a esfuerzos externos, lo que implica que el fabricante debe tener resguardo suficiente al momento de la construcción y montaje del núcleo.

El uso del metal amorfo implica indirectamente abastecerse con infraestructura necesaria para su producción: máquinas especiales de corte (las cuales son bastante diferentes a las usadas con acero al silicio), horno de templado (para que el núcleo alcance el punto óptimo en cuanto a pérdidas y excitación) y máquinas bobinadoras aptas para enrollados rectangulares eficientes y de calidad. Consecuentemente, para utilizar apropiadamente toda esta maquinaria el fabricante debe capacitar a su mano de obra, pues el proceso de corte, armado, ensamblaje, etc. puede diferir notablemente de lo realizado regularmente [13].

Oportunidades de Mejora / Desafíos Futuros

Durante el presente documento de memoria se ha presentado con suficiente detalle las características del metal amorfo, sus ventajas y desventajas, tanto a nivel investigativo así como en un ejemplo teórico de diseño, considerando aspectos normativos, técnicos y económicos.

Es natural entonces estimar que los pasos siguientes debiesen ser, primeramente, la fabricación de un prototipo de transformador basado en el diseño de núcleo enrollado aquí propuesto; y posteriormente, la certificación final del equipo realizándole las pruebas eléctricas respectivas (definidas mediante norma IEC, ANSI, etc.). Con este procedimiento se podría validar en la práctica, por ejemplo, los valores de pérdidas del transformador, impedancia, corriente de excitación, etc. y realizar una comparación exhaustiva entre el diseño teórico y el físico. De hecho, la elaboración de un transformador con núcleo amorfo podría permitir realizar ajustes al software de cálculo, de manera tal de hacerlo más exacto en cuanto a sus resultados (adición de factores empíricos).

Por lo tanto, se podría verificar más allá de la teoría las bondades propuestas (y también las dificultades) del acero amorfo tan ampliamente divulgadas en la literatura actual, así como en los resultados obtenidos con el programa de cálculo de parte activa.

Sobre éste último también existen múltiples oportunidades de mejora: por ejemplo, su adecuación a otros tipos de aceros, con características y propiedades distintas que las de la aleación amorfa Metglas 2605SA1. Esto no sería dificultoso, pues, si es que se mantiene la configuración de núcleo enrollado, entonces la cantidad de parámetros que habría que modificar sería muy acotada (densidad del material, ancho de láminas, pérdidas específicas del material, factor de apilamiento, espesor del material).

Asimismo, uno de los desarrollos más interesantes sería el ajuste del programa de manera tal que considerara el caso de un transformador trifásico. Esta tarea debiese incluir una adecuación importante en la lógica matemática del cálculo del peso del material, dado que geoméricamente el cambio de un núcleo enrollado monofásico a uno trifásico es considerable (por ejemplo, si es que se decide utilizar un diseño tipo Evans o un núcleo de cinco piernas); así como el efecto de la inclusión del tipo de conexión en alta y baja tensión (delta, estrella). De todas maneras, la formulación general del resto de las variables debiese mantener como base lo realizado en el software de cálculo para el caso monofásico.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] N. Kent Haggerty, Timothy P. Malone, Dr. John Crouse, “Justifying the use of High Efficiency Transformers”, Artículo de IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), Paper n° PCIC-96-23, ISBN 0-7803-3587-2, 1996, páginas 191 – 199.
- [2] Varios autores, “Leonard Energy Transformers: The potential for global energy savings from high efficiency distribution transformers”, Reporte Técnico de ECI (European Copper Institute), Febrero 2005.
- [3] Norma Internacional “IEC 60076-1 Transformadores de Potencia, Parte 1: Generalidades”, Versión oficial en español, Primera edición 1993-03, página 9.
- [4] T. Kubo, H. Sachs, S. Nadel, “Opportunities for New Appliance and Equipment Efficiency Standards: Energy and Economic Savings beyond Current Standards Programs”, Informe de Investigación de ACEEE (American Council for an Energy-Efficient Economy), número de serie A016, Septiembre 2001.
- [5] Nelson Morales, Jorge Romo, “Apunte Transformadores, Sección 1: Transformadores monofásicos de don enrollados”, Publicación C/4, Oficina de Publicaciones Docentes, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, 1996, páginas 1 – 38.
- [6] Varios Autores, “LOT 2: Distribution and Power Transformers, Tasks 1 – 7”, Reporte Técnico de VITO (Vision on Technology), Enero 2011.
- [7] Presentación Powerpoint, “II Jornadas Internacionales de Innovación Energética – Eficiencia en Transformadores”, Endesa, http://www.cerien.upc.edu/jornades/jiie2006/ponencias/eficiencia_trafos.pdf
- [8] H. S. Chen, D. E. Polk, “Novel Amorphous Metal and Amorphous Metal Articles”, Patente de Invención/Descubrimiento (EEUU) n° 3856513, Diciembre 1974.
- [9] Thorston Steinmetz, Bogdan Cranganu-Cretu, “Investigations of No-Load and Load Losses in Amorphous Core Dry-Type Transformers”, Artículo de conferencia de ICEM (International Conference on Electrical Machines), XIX International Conference on Electrical Machines; Roma, 2010.
- [10] A. Sato, H. Terada, T. Nagata, S. Kurita, Y. Matsuda, K. Fukui, D. Azuma, R. Hasegawa, “Development of Distribution Transformer based on New Amorphous Metal”, Artículo de conferencia de CIRED (Congrès International des Réseaux Electriques de Distribution), Paper n° 0474, 20th International Conference on Electricity Distribution; Praga, Junio 2009.

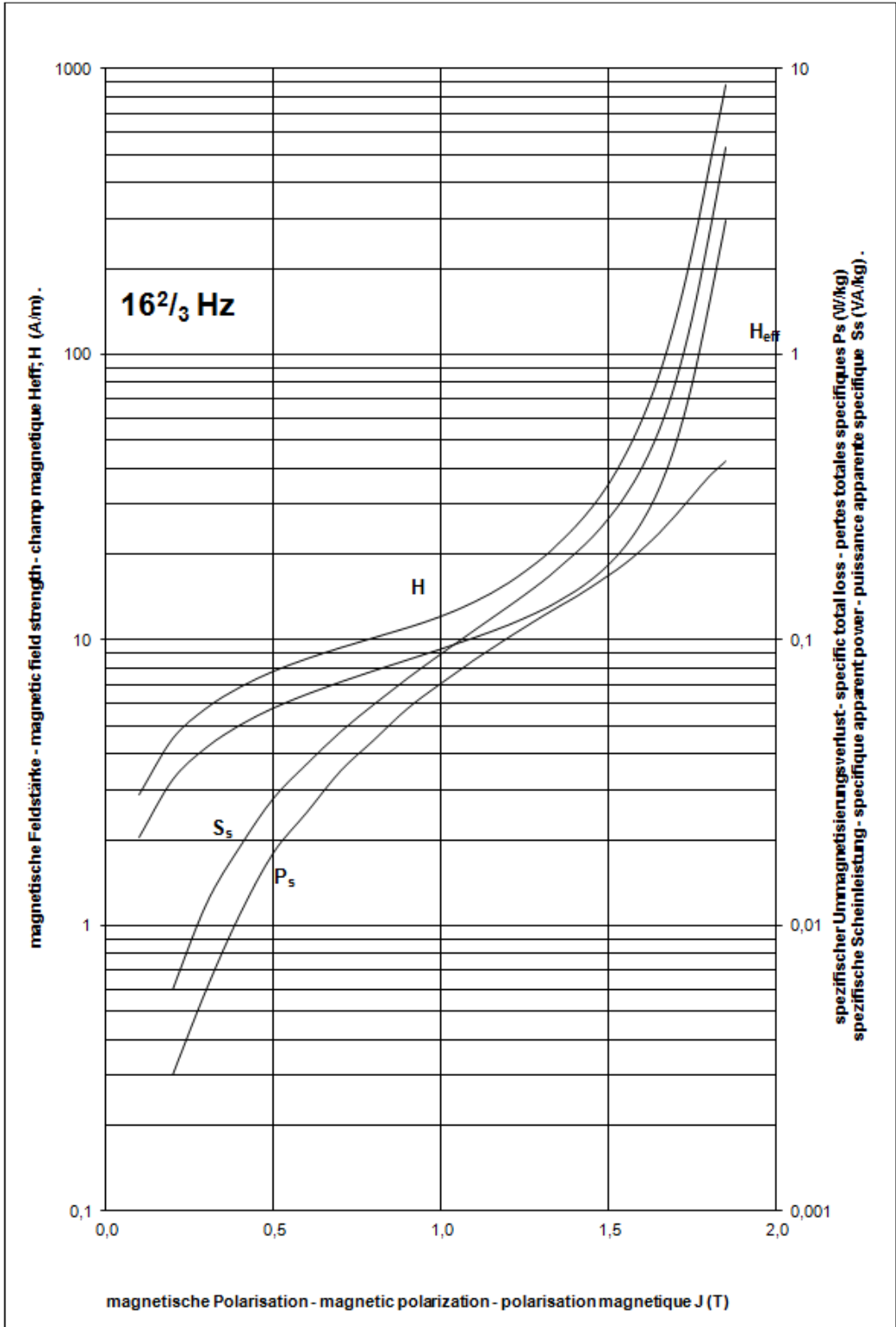
- [11] Edward Boyd, John D. Borst, “Design Concepts for an Amorphous Metal Distribution Transformer”, Artículo de IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, n° 11, Noviembre 1984, páginas 3365 – 3372.
- [12] L. A. Johnson, D. J. Bailey, “Application of Low Loss Amorphous Metals in Motors and Transformers”, Artículo de IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), PAS-101, Vol. 7, Julio 1982, páginas 2109 – 2114.
- [13] Bertrand Jarry, Patrick Lauzevis, Pierre Lagache, Michel Sacotte, “Amorphous Sheet Core Transformers under experimentation on the ERDF Network”, Artículo de conferencia de CIRED (Congrès International des Réseaux Electriques de Distribution), Paper n° 0090, 20th International Conference on Electricity Distribution; Praga, Junio 2009.
- [14] G. Segers, A. Even, M. Desmedt, “Amorphous Core Transformers: Behaviour in Particular Conditions and Design Comparisons”, Artículo de conferencia de CIRED (Congrès International des Réseaux Electriques de Distribution), Paper n° 438, 14th International Conference on Electricity Distribution; Birmingham, Junio 1997.
- [15] A. Basak, M. Yasin, “Use of Amorphous Magnetic Material in Distribution Transformers”, Artículo de conferencia de IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), Magnetic Ribbons and Wires in Power, Electronic and Automotive Applications, Noviembre 1990.
- [16] K. C. Lin, E. E. Zook, “Cast Thin Amorphous Metal for Stacked Core Power Transformers”, Artículo de conferencia de EEIC (Electrical Electronics Insulation Conference), Proceedings of the Electrical Electronics Insulation Conference: Chicago '89 EEIC/ICWA Exposition, Septiembre 1989, páginas 154 – 157.
- [17] N. J. DeCristofaro, G. E. Fish, C. E. Kroger, S. M. Lindquist, “Low Core Loss Amorphous Metal Magnetic Components for Electric Motors”, Patente de Invención/Descubrimiento (EEUU) n° 6784588, Agosto 2004.
- [18] M. L. Briggs, L. Bye Richard Jr., N. DeCristofaro, Dung A. Ngo, “High Stack Factor Amorphous Metal Ribbon and Transformer Cores”, Patente de Invención/Descubrimiento (EEUU) n° 6299989, Octubre 2001.
- [19] D. Li, L. Zhang, G. Li, Z. Lu, S. Zhou, “Reducing the Core Loss of Amorphous Cores for Distribution Transformers”, Artículo de Publicación: Progress in Natural Science: Materials International, Chinese Materials Research Society, Marzo 2012, páginas 244 – 249.
- [20] T. Hamada, T. Yoshida, Y. Yamamoto, K. Hanaoka, “Field Test at Japanese Utilities”, Artículo de conferencia de EPRI/CRIEPI (Electric Power Research Institute/ Central Research Institute of Electric Power Industry), Symposium on Amorphous Transformers, Tokyo, Marzo 1989.

- [21] M. D. Valenica, D. A. Schaffer, “Method of Making a Magnetic Core”, Patente de Invención/Descubrimiento (EEUU) n° 4709471, Diciembre 1987.
- [22] H. W. NG, R. Hasegawa, A. C. Lee, L. A. Lowdermilk, “Amorphous Alloy Core Distribution Transformers”, Artículo de publicación: Proceedings of the IEEE, Volumen 79, n° 11, Noviembre 1991, páginas 1608 – 1623.
- [23] Sitio web: <http://www.metglas.com/assets/pdf/2605sa1.pdf>; Metglas Inc., Hitachi Metals, 2011.
- [24] S. Sieradzki, R. Rygal, M. Soinski, “Apparent Core Losses and Core Losses in Five-Limb Amorphous Transformer of 160 kVA”, Artículo de publicación: IEE Transactions on Magnetics, Volumen 34, n° 4, Julio 1998, páginas 1189 – 1191.
- [25] Yeong-Hwa Chang, Chang-Hung Hsu, Ching-Pei Tseng, “Magnetic Properties Improvement of Amorphous Cores using Newly Developed Step-Lap Joints”, Artículo de publicación: IEE Transactions on Magnetics, Volumen 46, n° 6, Junio 2010, páginas 1719 – 1794.
- [26] Sitio web: <http://www.gaotune.com>; Gaotune Technologies Co., Ltd, 2012.
- [27] Sitio web: http://www.metglas.com/products/metglaspower/online_comparison_calculator.asp; Metglas Inc., Hitachi Metals.
- [28] J. C. Olivares-Galván, P. S. Georgilakis, R. Escarela Pérez, E. Campero-Littlewood, “Optimal Design of Single-Phase Shell-Type Distribution Transformers based on a Multiple Design Method validated by measurements”, Artículo de publicación: Electrical Engineering, Volumen 93, n° 4, Junio 2011, páginas 237 – 246.
- [29] Presentación Powerpoint, “Transformadores de Distribución de Alta Eficiencia”, Prolec GE, Simposium Latinoamericano de Energía 2007.
- [30] Sitio web: <http://www.evpelectric.com/product/showproduct.php?lang=en&id=19>; Everpower Electric Industries, 2012.
- [31] M. Mouhamad, C. Elleau, F. Mazaleyrat, C. Guillaume, B. Jarry, “Physicochemical and Accelerated Aging Tests of Metglas 2605SA1 and Metglas 2605HB1 Amorphous Ribbons for Power Applications”, Artículo de publicación: IEE Transactions on Magnetics, Volumen 47, n° 10, Octubre 2011, páginas 3192 – 3195.
- [32] S. Ezure, Y. Imai, H. Sato, S. Yamada, K. Yamanaka, S. Saito, “Long-term reliability of Amorphous Alloy Wound Core Distribution Transformers”, Artículo de publicación: IEE Transactions on Power Delivery, Volumen 9, n° 1, Enero 1994, páginas 249 – 256.

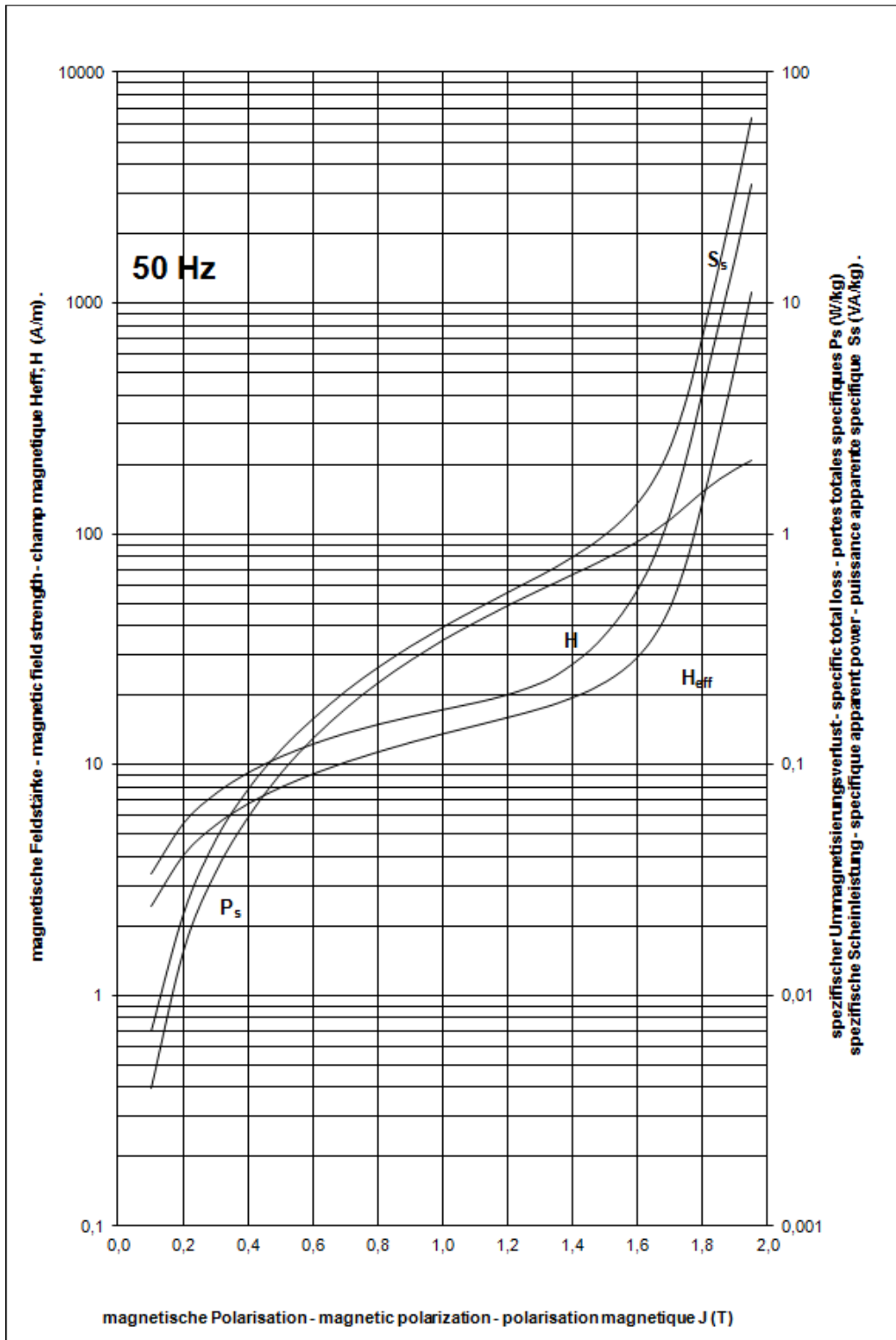
ANEXOS

ANEXO A

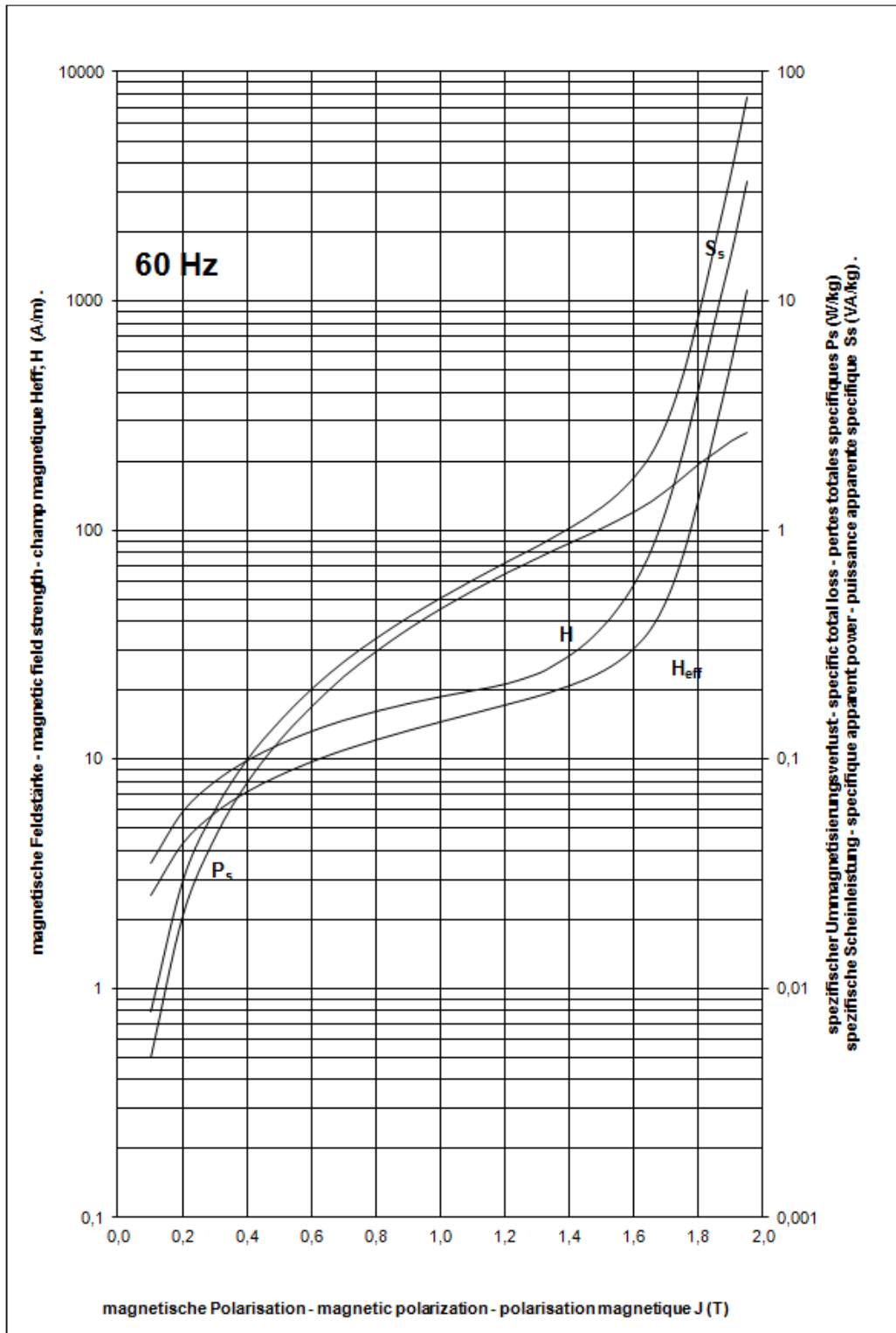
CURVAS PATRONES DE ACEROS AL SILICIO DE GRANO ORIENTADO, PARA DISTINTAS
FRECUENCIAS Y ESPESORES COMERCIALES



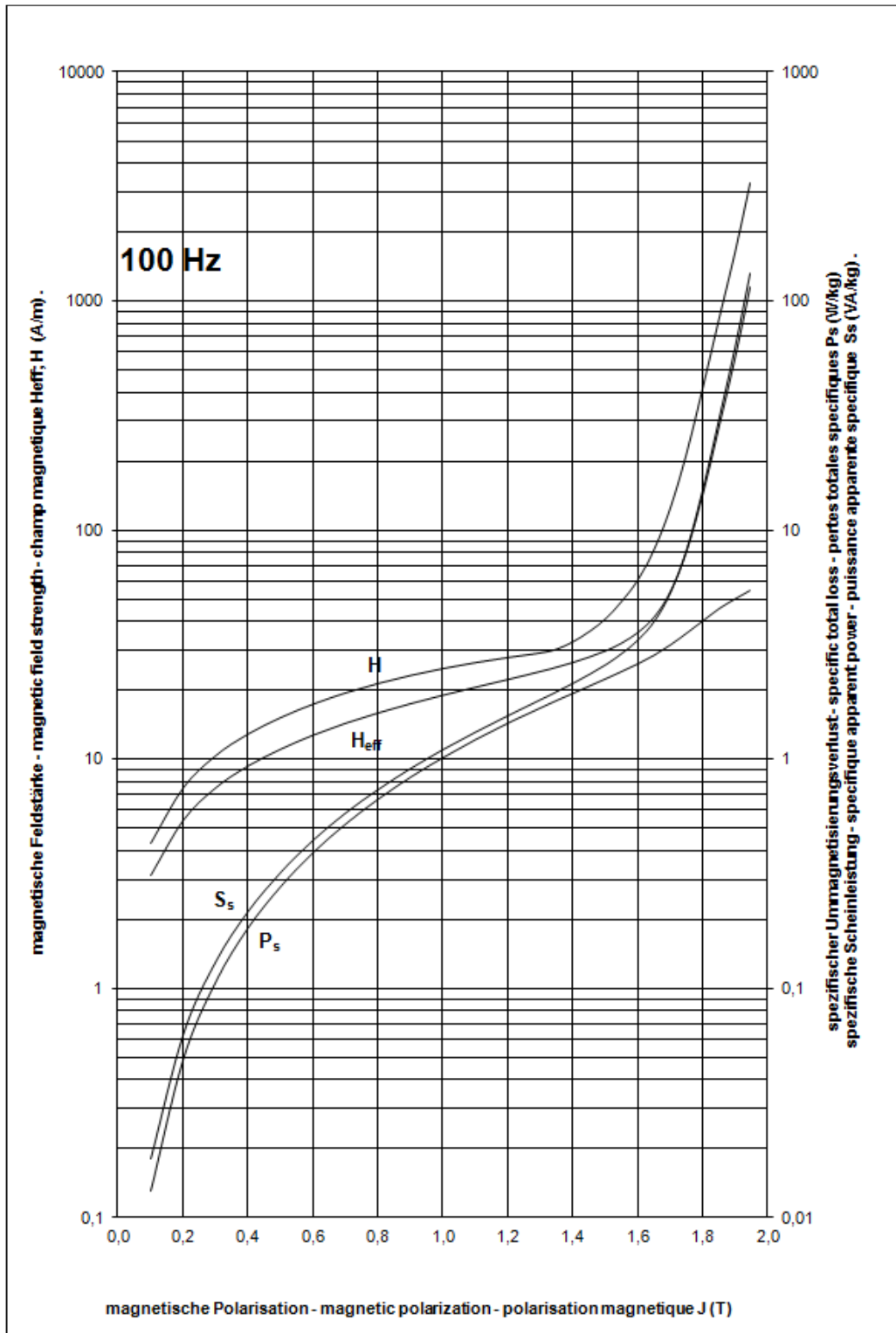
Anexo A.1: Curvas de Acero al Silicio de Grano Orientado, PowerCore C 120-27, espesor 0,27 mm, 16 Hz.



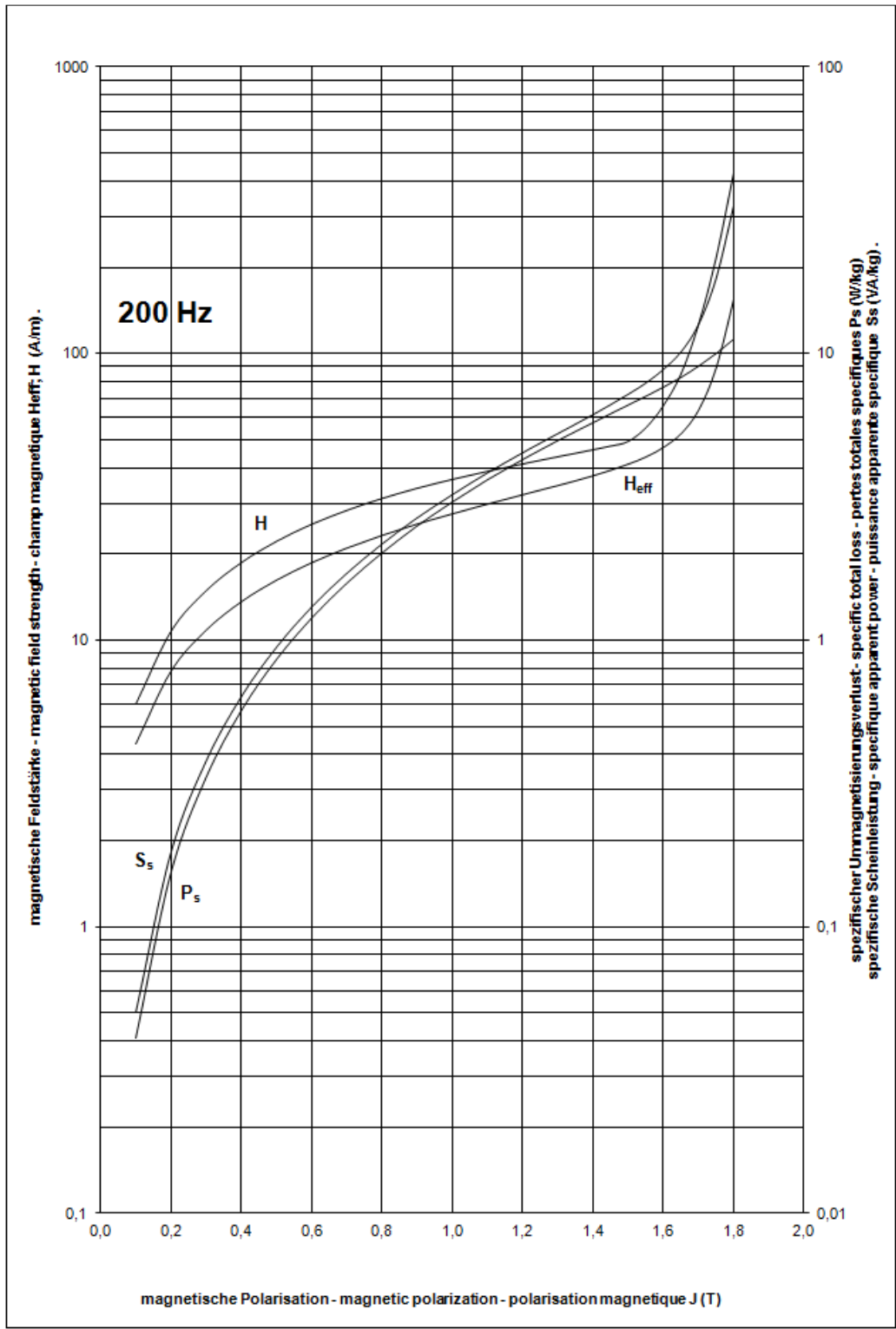
Anexo A.2: Curvas de Acero al Silicio de Grano Orientado, PowerCore C 120-27, espesor 0,27 mm, 50 Hz.



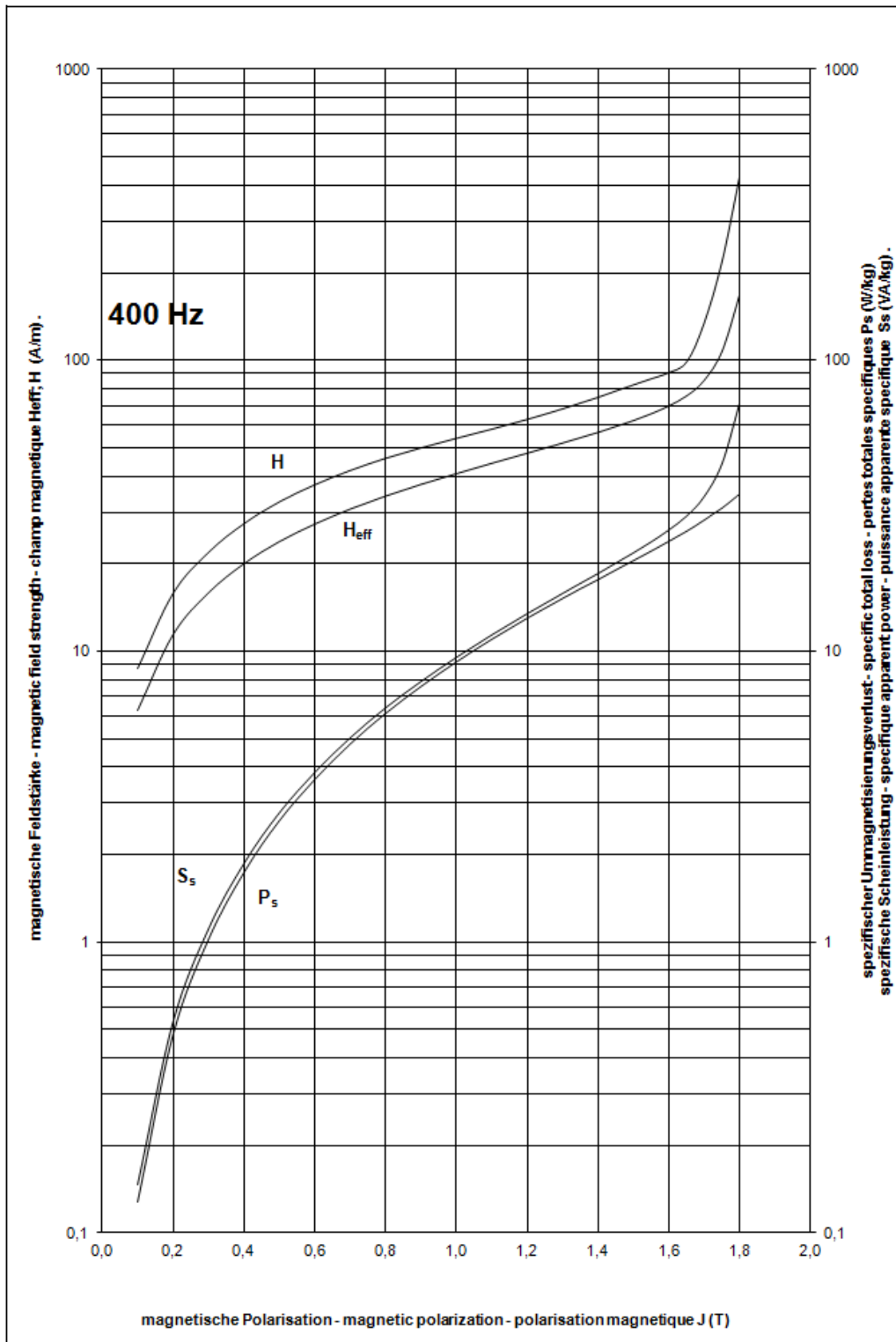
Anexo A.3: Curvas de Acero al Silicio de Grano Orientado, PowerCore C 120-27, espesor 0,27 mm, 60 Hz.



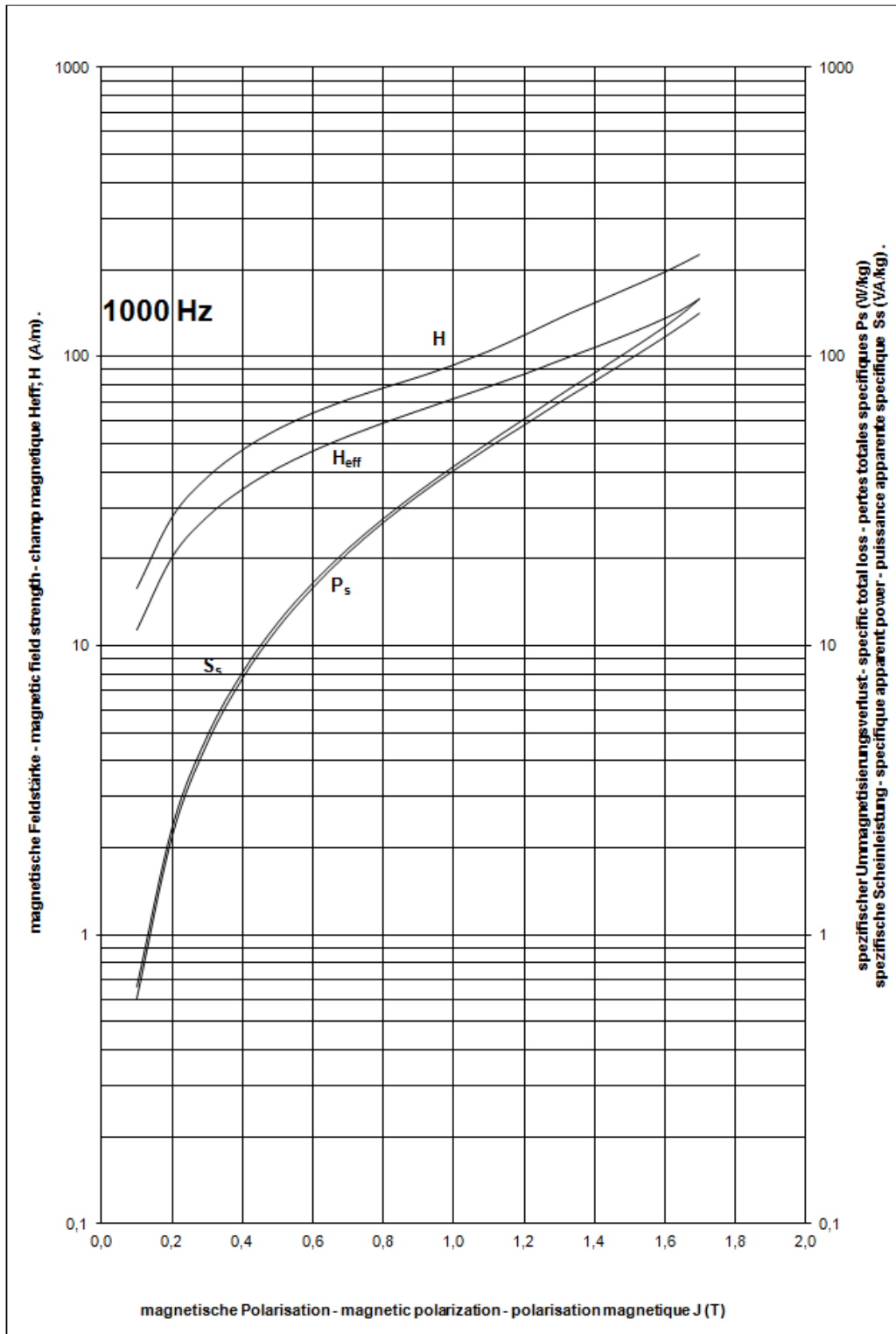
Anexo A.4: Curvas de Acero al Silicio de Grano Orientado, PowerCore C 120-27, espesor 0,27 mm, 100 Hz.



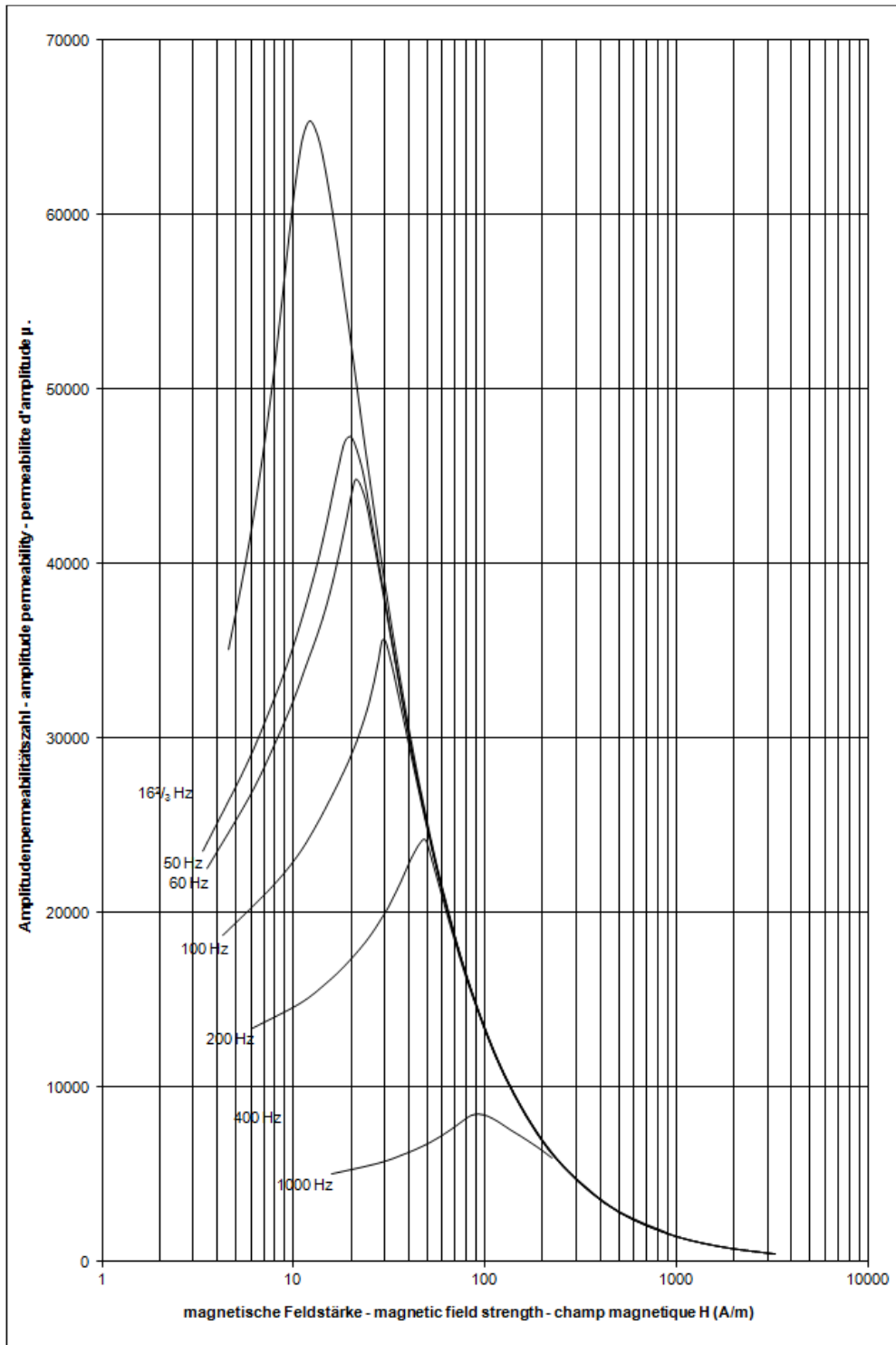
Anexo A.5: Curvas de Acero al Silicio de Grano Orientado, PowerCore C 120-27, espesor 0,27 mm, 200 Hz.



Anexo A.6: Curvas de Acero al Silicio de Grano Orientado, PowerCore C 120-27, espesor 0,27 mm, 400 Hz.



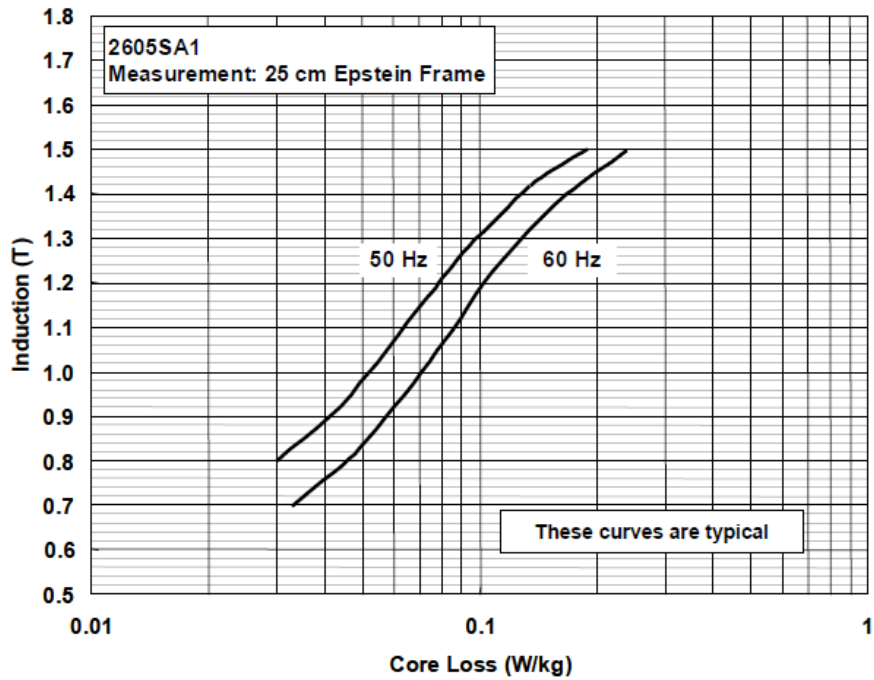
Anexo A.7: Curvas de Acero al Silicio de Grano Orientado, PowerCore C 120-27, espesor 0,27 mm, 1000 Hz.



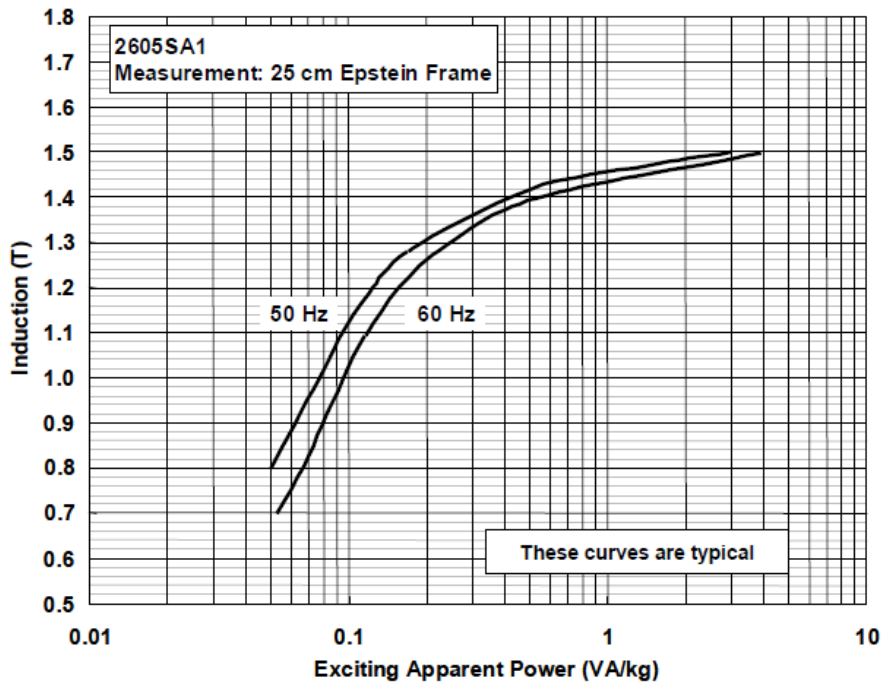
Anexo A.8: Amplitud de permeabilidad magnética según la intensidad de campo magnético a distintas frecuencias de interés, para Acero al Silicio de Grano Orientado, PowerCore C 120-27, espesor 0,27 mm.

ANEXO B

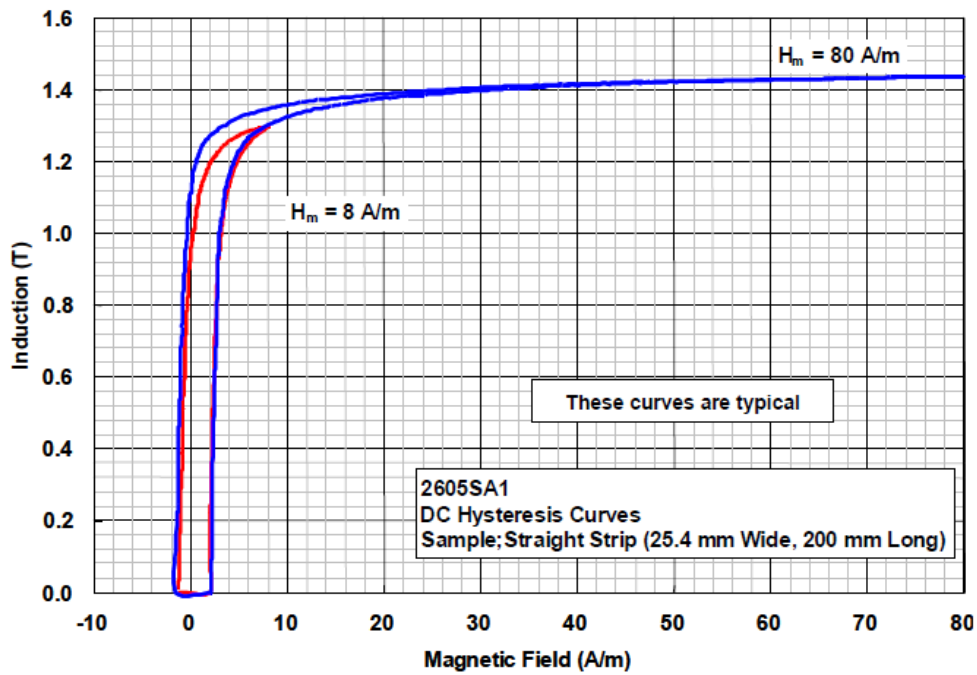
CURVAS PATRONES DE ALEACIÓN AMORFA BASADA EN HIERRO METGLAS 2605A1 Y
2605HB1M



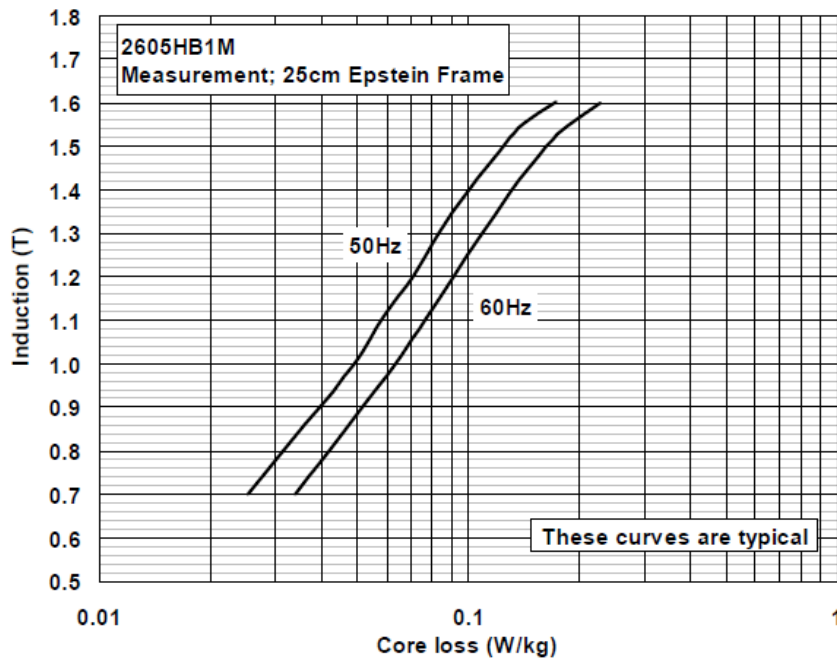
Anexo B.1: Curva de Pérdidas en Vacío para aleación amorfa Metglas 2605SA1, a 50 y 60 Hz respectivamente.



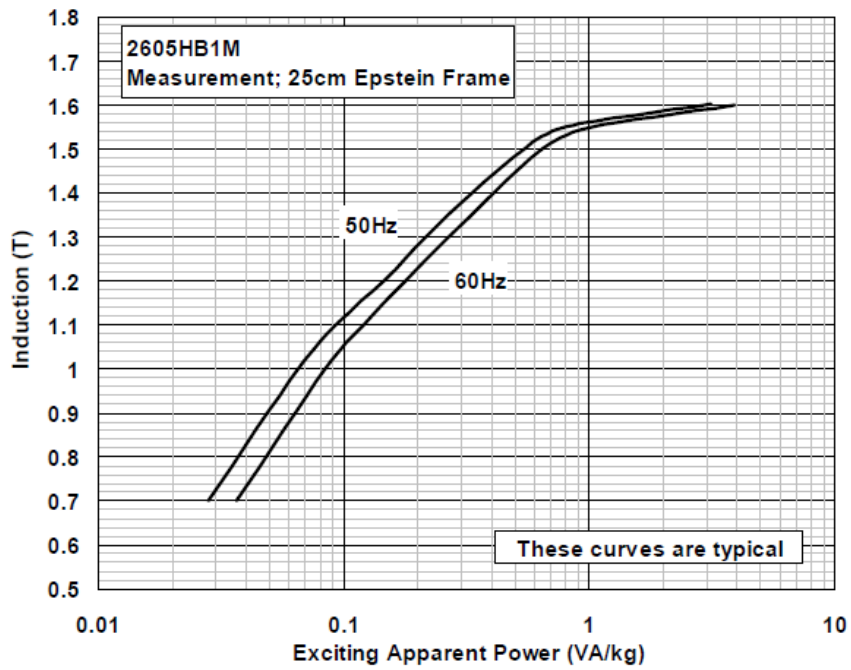
Anexo B.2: Curva de Potencia Aparente de Excitación para aleación amorfa Metglas 2605SA1, a 50 y 60 Hz respectivamente.



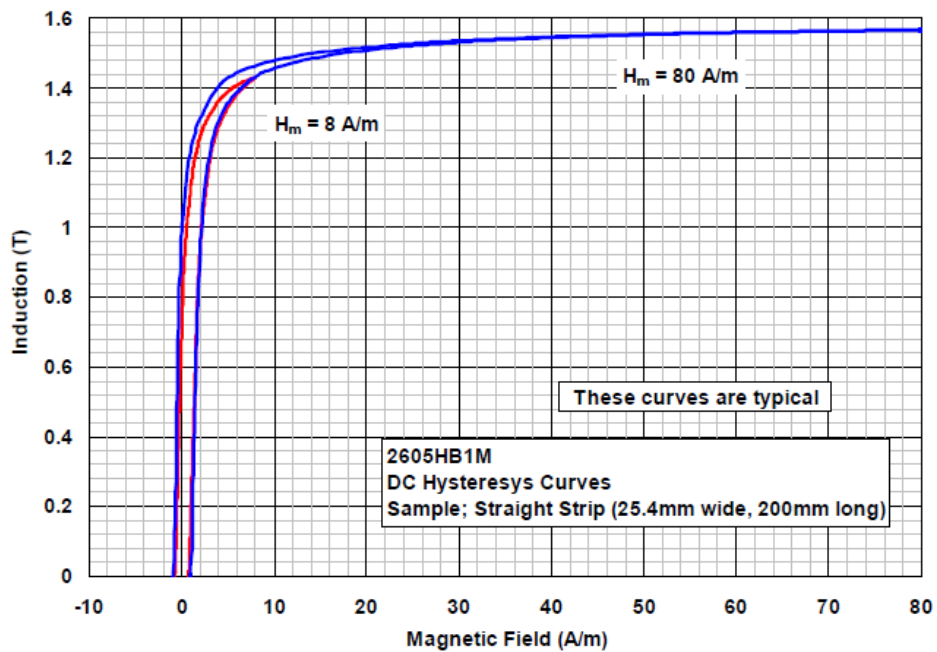
Anexo B.3: Curvas de Histéresis para aleación amorfa Metglas 2605SA1, a 8 y 80 A/m respectivamente.



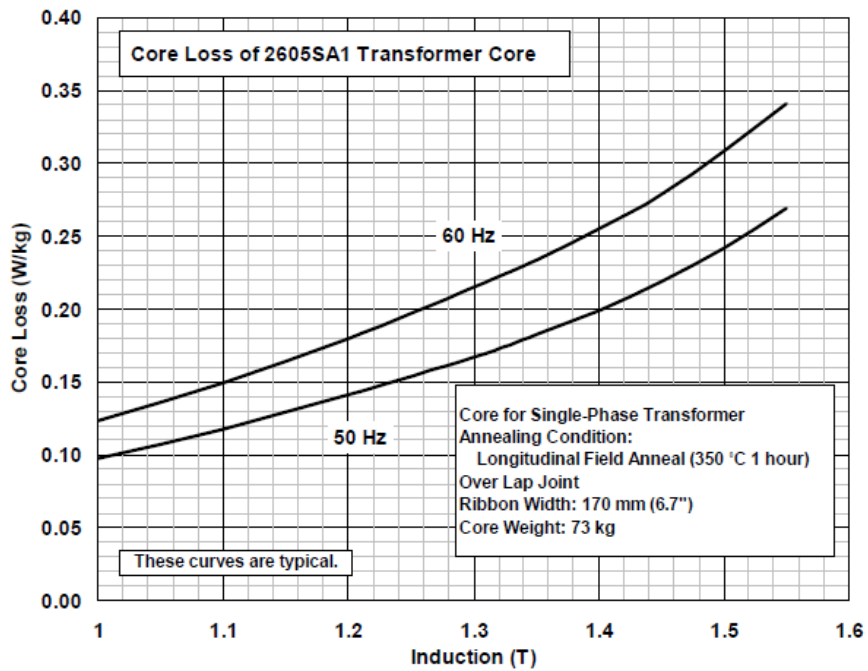
Anexo B.4: Curva de Pérdidas en Vacío para aleación amorfa Metglas 2605HB1M, a 50 y 60 Hz respectivamente.



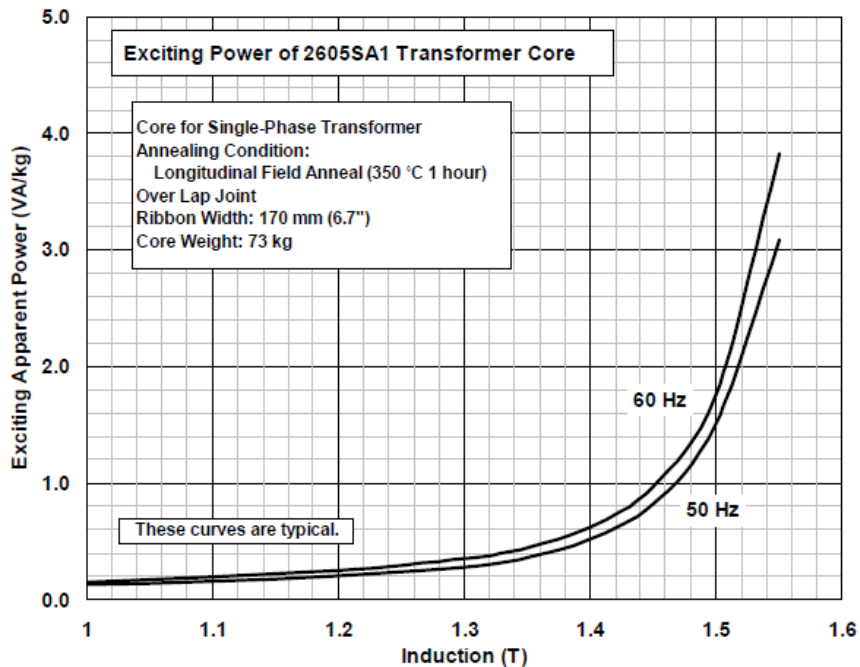
Anexo B.5: Curva de Potencia Aparente de Excitación para aleación amorfa Metglas 2605HB1M, a 50 y 60 Hz respectivamente.



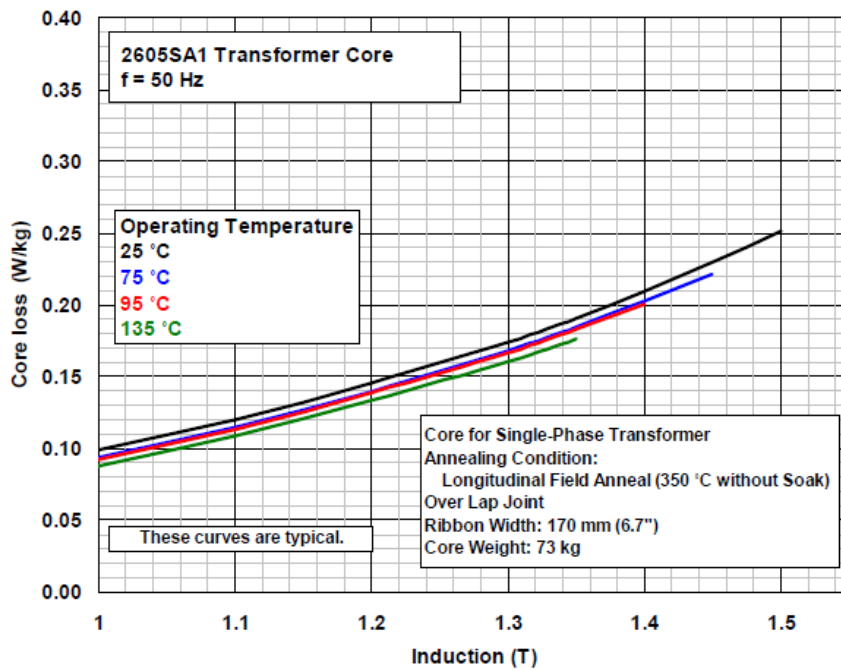
Anexo B.6: Curvas de Histéresis para aleación amorfa Metglas 2605HB1M, a 8 y 80 A/m respectivamente.



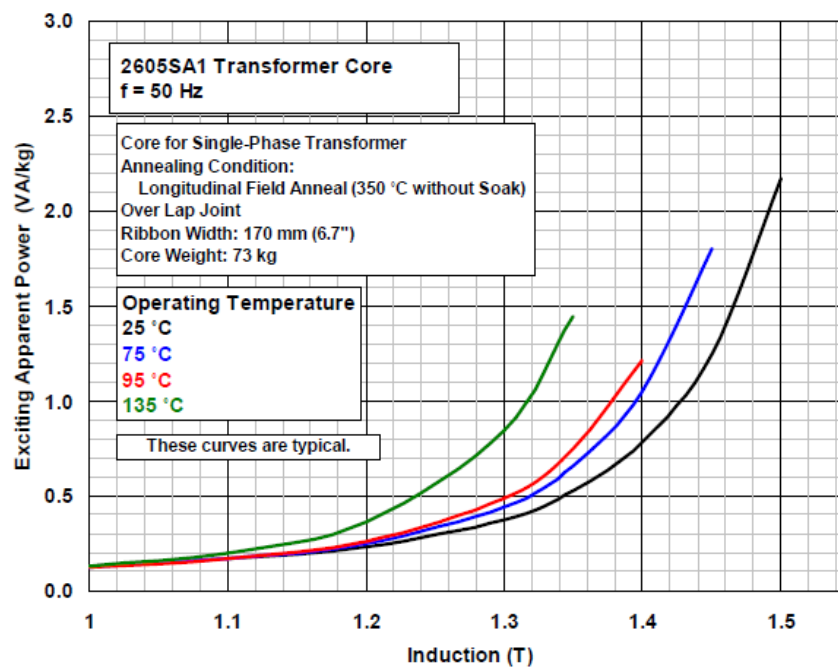
Anexo B.7: Curvas de Pérdidas en Vacío para núcleo de un transformador monofásico, fabricado con aleación amorfa Metglas 2605SA1, a 50 y 60 Hz respectivamente.



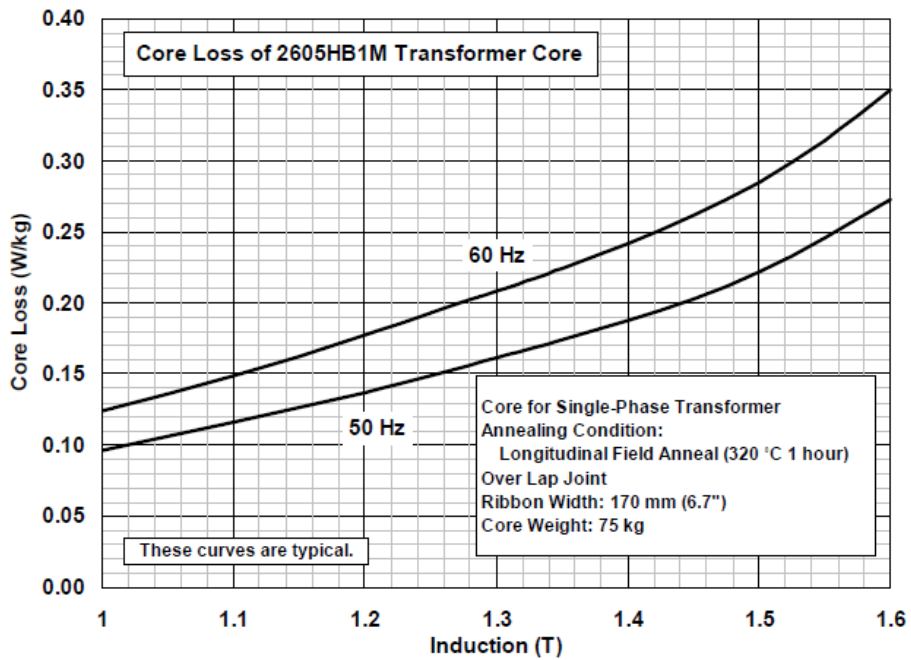
Anexo B.8: Curvas de Potencia Aparente de Excitación para núcleo de un transformador monofásico, fabricado con aleación amorfa Metglas 2605SA1, a 50 y 60 Hz respectivamente.



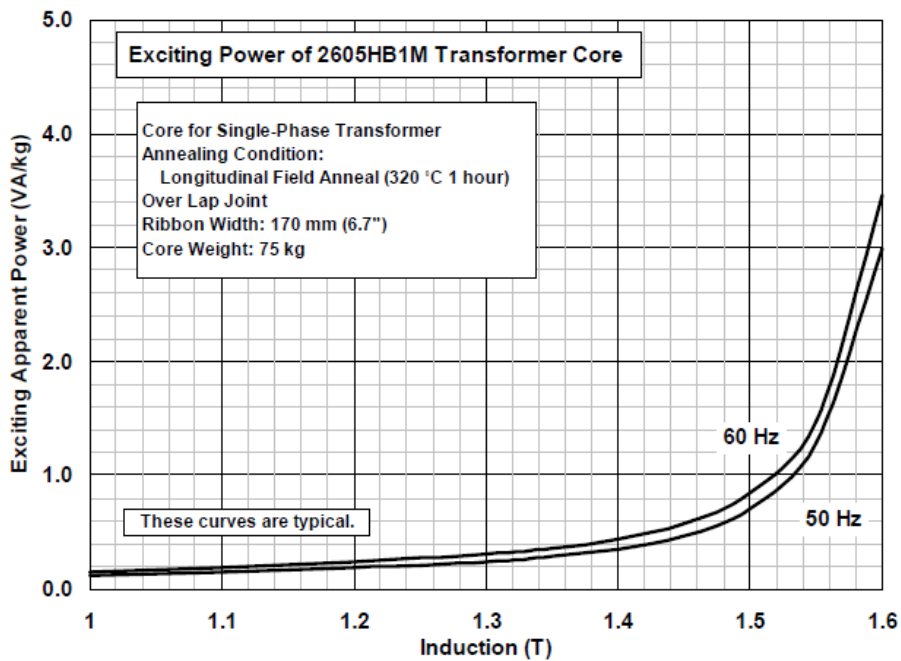
Anexo B.9: Curvas de Pérdidas en Vacío para núcleo de un transformador monofásico, fabricado con aleación amorfa Metglas 2605SA1, a 50 Hz, para distintas temperaturas de operación.



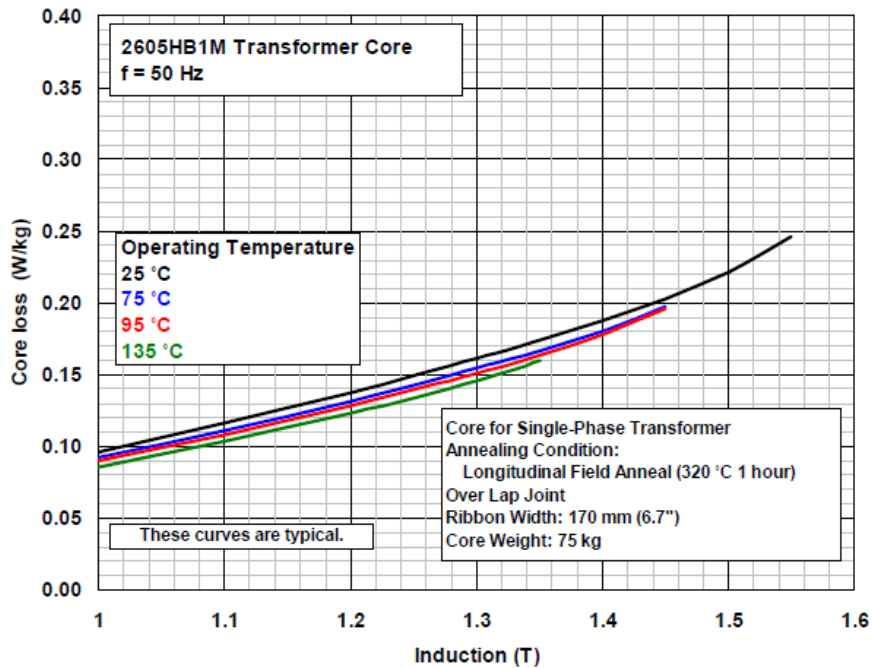
Anexo B.10: Curvas de Potencia Aparente de Excitación para núcleo de un transformador monofásico, fabricado con aleación amorfa Metglas 2605SA1, a 50 Hz, para distintas temperaturas de operación.



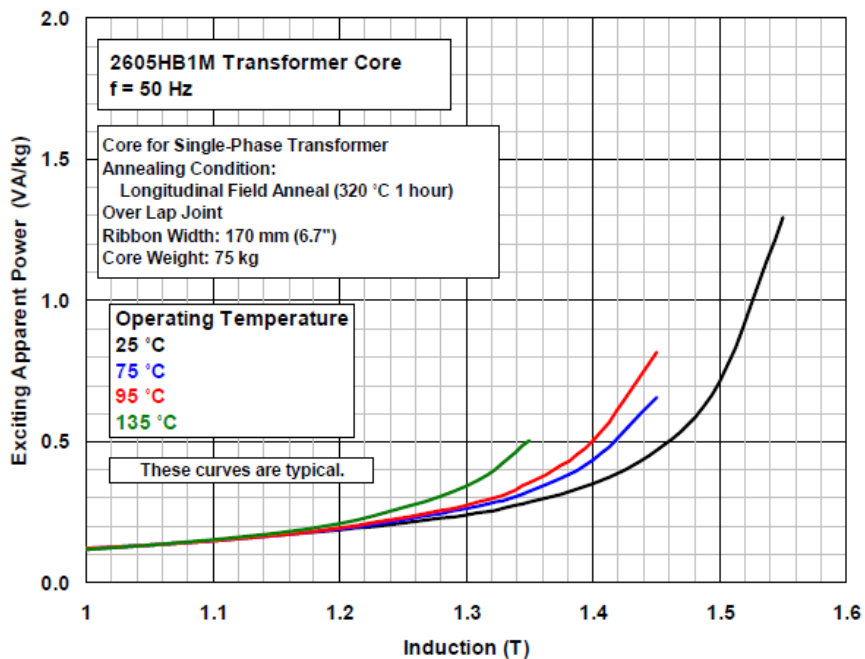
Anexo B.11: Curvas de Pérdidas en Vacío para núcleo de un transformador monofásico, fabricado con aleación amorfa Metglas 2605HB1M, a 50 y 60 Hz respectivamente.



Anexo B.12: Curvas de Potencia Aparente de Excitación para núcleo de un transformador monofásico, fabricado con aleación amorfa Metglas 2605HB1M, a 50 y 60 Hz respectivamente.



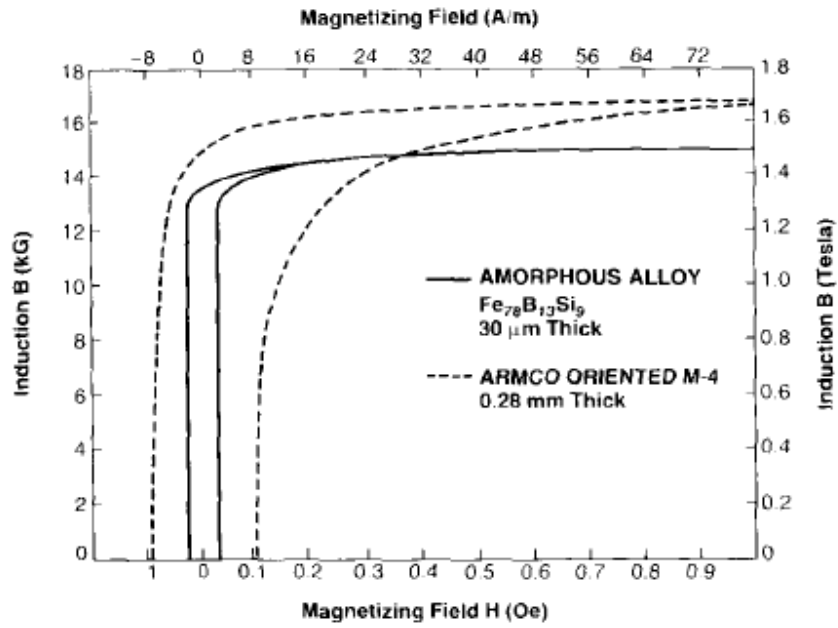
Anexo B.13: Curvas de Pérdidas en Vacío para núcleo de un transformador monofásico, fabricado con aleación amorfa Metglas 2605HB1M, a 50 Hz, para distintas temperaturas de operación.



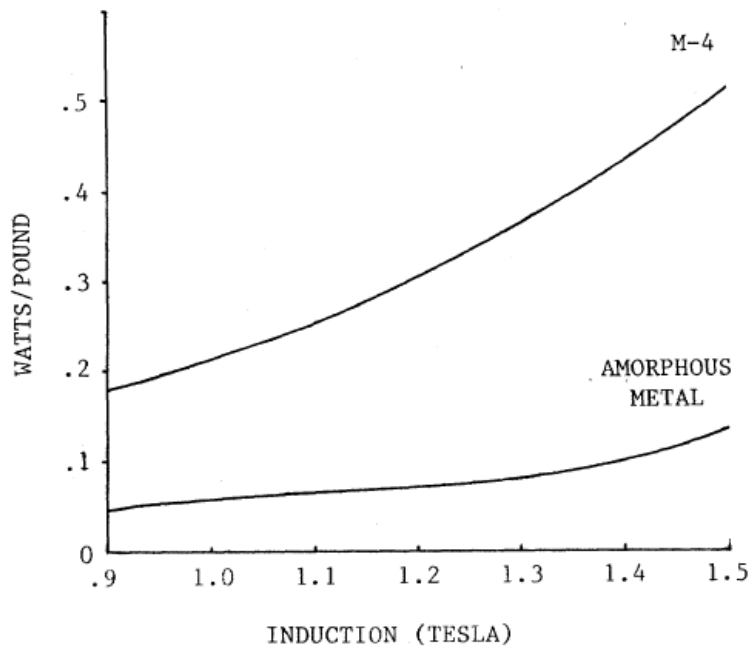
Anexo B.14: Curvas de Potencia Aparente de Excitación para núcleo de un transformador monofásico, fabricado con aleación amorfa Metglas 2605HB1M, a 50 Hz, para distintas temperaturas de operación.

ANEXO C

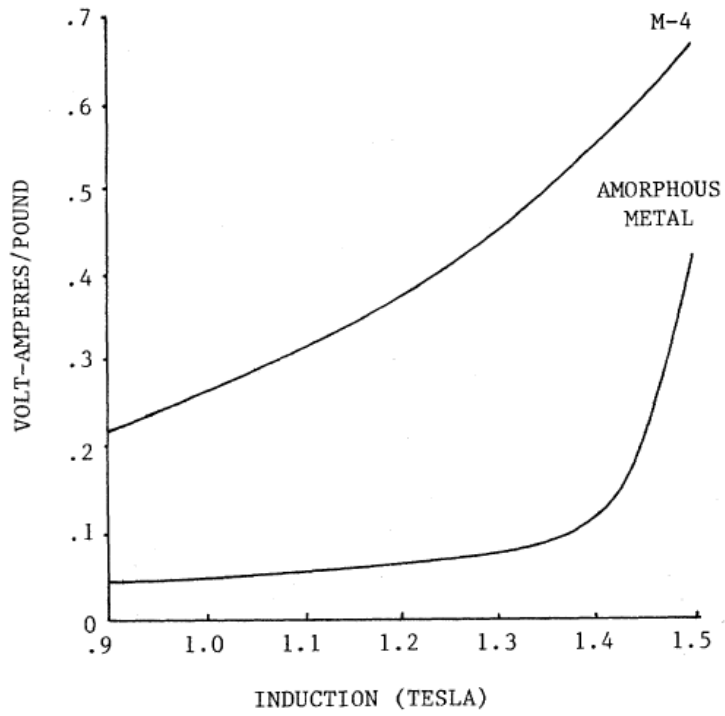
CURVAS DE COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS ENTRE ACEROS AL SILICIO DE
GRANO ORIENTADO Y ACERO DE ALEACIÓN AMORFA



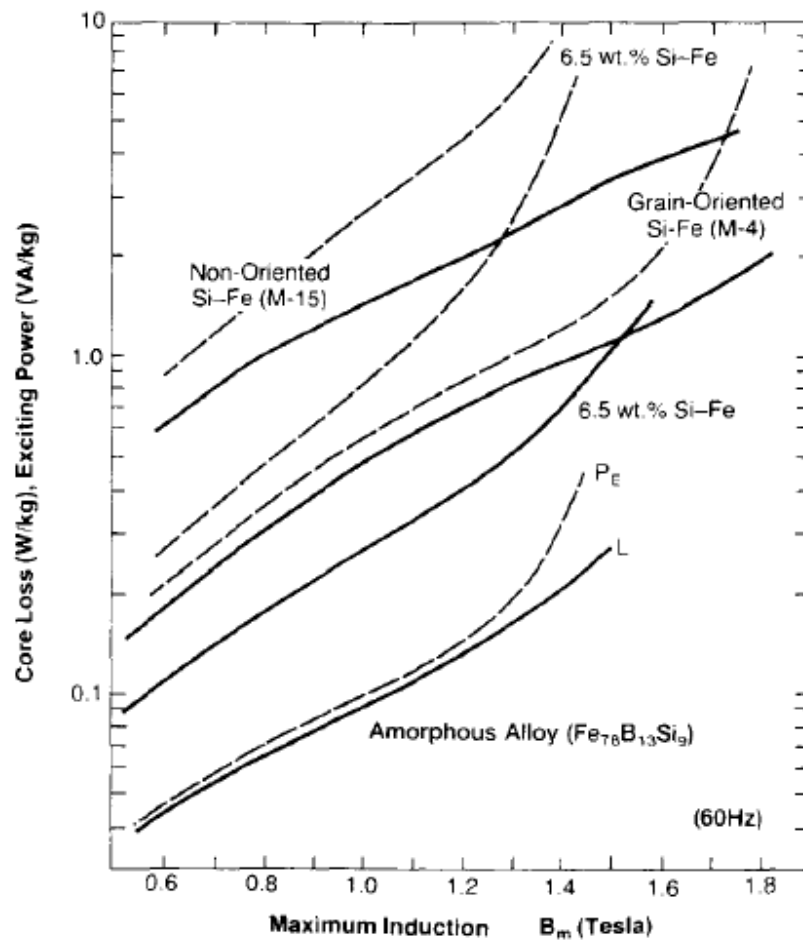
Anexo C.1: Curva de Histéresis B – H para acero al silicio convencional grado M4 (línea punteada) y aleación amorfa Fe₇₈B₁₃Si₉ (línea continua).



Anexo C.2: Curva de Pérdidas en Vacío para acero al silicio convencional grado M4 y aleación amorfa Metglas 2605S-2; a 60 Hz.



Anexo C.3: Curva de Potencia de Excitación para acero al silicio convencional grado M4 y aleación amorfa Metglas 2605S-2; a 60 Hz.



Anexo C.4: Curvas de Pérdidas en Vacío (L) y Potencia de Excitación (P_E) para acero al silicio convencional grado M4, acero cristalino solidificado rápidamente con alto contenido de silicio y aleación amorfa estándar.