CANAME

SE
SECRETARÍA
DE ECONOMÍA

Solicitud de Apoyo Programa para el Desarrollo de las Industrias de Alta Tecnología (PRODIAT)

Índice de Entregables

CANAME

SE
SECRETARÍA DE ECONOMÍA

Solicitud de Apoyo Programa para el Desarrollo de las Industrias de Alta Tecnología (PRODIAT)

I. Diagnóstico de las normas motivadoras de cambio e innovación en las empresas manufactureras del Sector Eléctrico

II. Informe de identificación de las familias y productos que ameriten de un estudio focalizado de Vigilancia e Inteligencia Tecnológica Competitiva

III. Resultado del Estudio de Inteligencia y Vigilancia Tecnológica Competitiva del Sector Eléctrico

IV. Diseño del Prototipo de Transformador de distribución, con base en los nuevos estándares de la NOM-002-SEDE-Transformadores de Distribución

V. Informe Financiero

CANAME

SE

SECRETARÍA
DE ECONOMÍA

Solicitud de Apoyo Programa para el Desarrollo de las Industrias de Alta Tecnología (PRODIAT)

I. Diagnóstico de las normas motivadoras de cambio e innovación en las empresas manufactureras del Sector Eléctrico

CANAME

SE SECRETARÍA DE ECONOMÍA

IMPACTO DEL INCREMENTO DE LA EFICIENCIA EN LAS NORMAS MEXICANAS Y ESPECIFICACIONES DE CFE DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN.

En esta documento se hace un comparativo entre la NOM-SEDE-002-2010 y la NOM-002-SEDE/ENER-2012 para identificar las diferencias que nos permitan analizar el impacto que tendrá está última en las normas mexicanas y especificaciones de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) que rigen el diseño, construcción y pruebas para los transformadores de distribución en México.

DIFERENCIAS ENTRE LA NOM-002-SEDE-2010 Y LA NOM-002-SEDE/ENER-2012

Las diferencias más significativas entre la NOM-SEDE-002-2010 y la NOM-002-SEDE/ENER-2012, en primera instancia es que en esta última se adiciona el apartado número 10 de nombre Procedimiento para la Evaluación de la Conformidad (PEC), que plantea mecanismos adicionales para la supervisión periódica del cumplimiento en los niveles de eficiencia que las empresas productoras de transformadores de distribución deberán de cumplir través de la obtención del certificado de la conformidad del producto a la NOM, el cual se obtendrá a través de un Organismo de Certificación para producto, acreditado en los términos establecidos en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización. Por lo que para obtener el certificado de la conformidad del producto, el solicitante podrá optar por dos modalidades, la primera a través de la verificación mediante pruebas periódicas al producto, o por la segunda modalidad de sistemas de aseguramiento de la calidad de la línea de producción.

Los certificados NOM se podrán obtener por Familia de productos. Para efectos de certificación de producto se consideran familia de productos a aquellos transformadores que están comprendidos en la tabla 3.1 y cumplan con los criterios siguientes: Ser del mismo tipo (poste, subestación, pedestal y sumergible). Ser del mismo número de fases (trifásico o monofásico).Fabricarse en la misma planta productiva. Pertenecer a los intervalos de capacidad y tensión del sistema, establecidos en la tabla 3.1.

TABLA 3.1 Clasificación de familias de producto.

	Capacidad (kVA)	Tensión del sistema kV rmc		
		Hasta 15	Hasta 25	Hasta 34,5
Monofásicos	10 a 50	Familia	Familia	Familia
	51 a 167	Familia	Familia	Familia
Trifásicos	15 a 150	Familia	Familia	Familia
	151 a 500	Familia	Familia	Familia

El modelo representativo por familia enviado a pruebas de laboratorio debe ser el de mayor capacidad de acuerdo a la solicitud para la certificación de producto.

La Vigencia de los certificados de la conformidad del producto será de un año a partir de la fecha de su emisión, para los certificados de la conformidad con verificación mediante pruebas periódicas al producto.
Tres años a partir de la fecha de emisión, para los certificados de la conformidad con verificación mediante el sistema de aseguramiento de la calidad de la línea de producción.

Las vigencias anteriores estarán sujetas al seguimiento correspondiente, en los términos de la sección siguiente.

El Seguimiento a los certificados de la conformidad del producto estará sujeto a seguimiento o proceso de verificación periódica, en los términos establecidos en el Artículo 80 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, por parte del Organismo de Certificación para producto.

Los gastos que se originen por los seguimientos en actos de evaluación de la conformidad serán a cargo de la persona a quien se efectúe ésta.

Los seguimientos se efectuarán en los productos que se encuentren en las fábricas, bodegas o en lugares de comercialización en el territorio nacional.

Los seguimientos para la certificación de la conformidad del producto se realizarán en dos modalidades, una que hace referencia a la realización de pruebas periódicas al producto dos veces al año.

La otra modalidad de certificación será por medio del sistema de aseguramiento de la calidad de la línea de producción., la cual podrá seguir el siguiente procedimiento:

a) Por muestreo a producto y por medio de verificación del cumplimiento de las especificaciones de las pruebas referidas en el numeral 5.2.2 (pérdidas en vacío (núcleo) y pérdidas debidas a la carga) y la "Preservación del líquido aislante (Hermeticidad)" mencionada en el párrafo 5.1.2 de la NOM-002-SEDE/ENER-2012
b) Mediante envío al Organismo de Certificación para producto o a la DGGIE-SE y CONUEE, de los resultados de la auditoría de seguimiento al sistema de aseguramiento de la calidad certificado. La auditoría debe ser efectuada por un Organismo de Certificación para sistemas de aseguramiento de la calidad. Una vez al año.
Los resultados de las pruebas de laboratorio que se practiquen al producto durante el seguimiento correspondiente, serán tomados en cuenta por el Organismo de Certificación para producto, según se trate para efectos de suspender, cancelar y/o extender la vigencia del certificado de la conformidad del producto, de acuerdo a lo indicado en el numeral 10.4.3 de la NOM-002-SEDE/ENER-2012

En aquellos casos en los que del resultado del seguimiento de los productos se determine incumplimiento a la NOM o cuando la misma no pueda llevarse a cabo por causa imputable a la empresa a quien se pretende verificar, el Organismo de Certificación para producto debe dar aviso inmediato a la Dependencia y al titular del certificado de la

conformidad, de la suspensión o cancelación del certificado de la conformidad además de las sanciones que procedan.

En caso de perder la vigencia o validez del certificado de la línea de producción del sistema de aseguramiento de la calidad, el titular del certificado de la conformidad debe dar aviso inmediato al Organismo de Certificación para producto. El certificado de la conformidad quedará suspendido definitivamente a partir de la fecha de terminación de la auditoría realizada por el Organismo de Certificación para sistemas de aseguramiento de la calidad. El titular del certificado podrá solicitar la modalidad de certificación con verificación mediante pruebas periódicas a producto. En caso de suspender la vigencia del certificado de la línea de producción del sistema de aseguramiento de la calidad, el titular del certificado de la conformidad debe dar aviso inmediato al Organismo de Certificación para producto. El certificado de la conformidad queda suspendido por un periodo máximo de sesenta días naturales a partir de la fecha de terminación de la auditoría realizada por el Organismo de Certificación para sistemas de aseguramiento de la calidad. Si al término de los sesenta días naturales anteriormente señalados se restablece la vigencia del certificado del sistema de aseguramiento de la calidad, se entiende que la vigencia del certificado de la conformidad expira en la fecha para la que originalmente fue otorgada. En caso contrario dicho certificado queda automáticamente cancelado y el Organismo de Certificación para producto, debe notificar de inmediato a la Dependencia. El titular del certificado puede solicitar la modalidad de certificación con verificación mediante pruebas periódicas a producto.[3.1]

Otro de los cambios está relacionado con el método de cálculo de la eficiencia energética, el cual se muestra en la fórmula 3.1 [3.2].

$$\%E = \frac{100*(P*kVA*1000)}{(P*kVA*1000)+NL+(LL*P^2*T)} \qquad [3.1]$$

Dónde:

P = Carga por unidad (0,8)

kVA = kVA (nominal)

NL = Pérdidas en vacío a temperatura ambiente W

LL = Pérdidas debidas a la carga a temperatura de referencia (a 85°C,) W y

T = Factor de corrección para las pérdidas de carga a 70 °C (0,952332)

Que a diferencia de la norma NOM-SEDE-002-2010 donde el método de cálculo es como se muestra en la fórmula 3.2 [3.1]

$$\%E = \frac{Ps}{Pe}*100 \qquad [3.2]$$

Y

$$Pe = (Ps + NL + LL) \qquad [3.3]$$

Dónde:

Ps = es la potencia de salida en W (capacidad nominal);

Pe = es la potencia de entrada en W;

Como se observa en la fórmula 3.1 se adicionaron dos factores para el cálculo de la eficiencia, uno relacionado con la carga de factor de potencia unitario además de un espectro de cargabilidad estándar del 80 % constante [3.3] además de otro factor relacionado con la corrección para las pérdidas con carga. Lo que se traduce en un impacto directo en los valores de eficiencia tal como se observa en el ejemplo de la tabla 3.2, donde se evalúa el desempeño de un transformador típico de 75 kVA con devanados cobre –aluminio para alta y baja tensión respectivamente.

TABLA 3.2 Comparación método de cálculo

Versiones NOM-002	kVA	*LL*	*NL*	%E
NOM-002-SEDE-2010	75	962	254	98.40
NOM-002-SEDE/ENER-2012				98.61

Lo cual refleja un diferencial de 0.21 a favor utilizando la NOM-002-SEDE/ENER-2012, lo que quiere decir que utilizando las mismas pérdidas pero calculando la eficiencia con las fórmula 3.1, resulta que el valor de eficiencia se incrementa. Lo que nos hace en primera instancia suponer que se está siendo más flexible para la estimación del valor de eficiencia, sin embargo al observar la tabla 3.3 se observa que el valor de eficiencia para esta capacidad se incrementa a un valor de 99.21 % lo que representa un diferencial de 2.6 % con respecto al valor de 96.61% corregido, lo que implicaría una mejora sustancial en el diseño, proyecto y construcción de un aparato convencional de 75 kVA con núcleo de acero al silicio en grado M-4.

Tabla 3.3 Eficiencias energéticas NOM-002-SEDE/ENER-2012

TIPO DE ALIMENTACION	CAPACIDAD EN kVA	NIVEL BASICO DE AISLAMIENTO		
		Hasta 95 (clase 15 kV)	Hasta 150 (Clase 18 y 25 kV)	Hasta 200 (clase 34,5 kV)
Monofásico	10	98,61%	98,49%	98,28%
	15	98,75%	98,63%	98,43%
	25	98,90%	98,79%	98,63%
	37,5	98,99%	98,90%	98,75%
	50	99,08%	98,99%	98,86%
	75	99,21%	99,12%	99,00%
	100	99,26%	99,16%	99,06%
	167	99,30%	99,21%	99,13%
Trifásico	15	98,32%	98,18%	98,03%
	30	98,62%	98,50%	98,35%
	45	98,72%	98,60%	98,48%
	75	98,86%	98,75%	98,64%
	112,5	98,95%	98,85%	98,76%
	150	99,03%	98,94%	98,86%
	225	99,06%	98,96%	98,87%
	300	99,11%	99,02%	98,92%
	500	99,20%	99,11%	99,03%

vigor de la NOM-002-SEDE/ENER-2012. Lo que implica que deberá ser modificada.

- K0000-07 TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS TIPO PEDESTAL DE 300KVA Y 500KVA PARA DISTRIBUCIÓN SUBTERRÁNEA [3.11].
  - Esta especificación pone como límite para los valores de pérdidas de vacío y a plena carga, que se mencionan en norma NMX-J-285-ANCE-2005, la cual como se ha analizado se ve afectada de manera significativa con la entrada en vigor de la NOM-002-SEDE/ENER-2012. Lo que implica que deberá ser modificada.

- K0000-08 TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS TIPO PEDESTAL HASTA 225 KVA PARA DISTRIBUCIÓN SUBTERRÁNEA [3.12].
  - Esta especificación pone como límite para los valores de pérdidas de vacío y a plena carga, que se mencionan en norma NMX-J-285-ANCE-2005, la cual como se ha analizado se ve afectada de manera significativa con la entrada en vigor de la NOM-002-SEDE/ENER-2012. Lo que implica que deberá ser modificada.

- K0000-05 TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS TIPO SUMERGIBLE DE 300KVA Y 500KVA PARA DISTRIBUCIÓN SUBTERRÁNEA [3.13].
  - Esta especificación pone como límite para los valores de pérdidas de vacío y a plena carga, que se mencionan en norma NMX-J-287-ANCE-1998, la cual como se ha analizado se ve afectada de manera significativa con la entrada en vigor de la NOM-002-SEDE/ENER-2012. Lo que implica que deberá ser modificada.

- K0000-019 TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS TIPO SUMERGIBLE HATA 100KVA PARA DISTRIBUCIÓN SUBTERRÁNEA.[3.14]
  - Esta especificación pone como límite para los valores de pérdidas de vacío y a plena carga, que se mencionan en norma NMX-J-287-ANCE-1998, la cual como se ha analizado se ve afectada de manera significativa con la entrada en vigor de la NOM-002-SEDE/ENER-2012. Lo que implica que deberá ser modificada.

- K0000-022 TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS TIPO SUMERGIBLE HASTA 225 KVA PARA DISTRIBUCIÓN SUBTERRÁNEA.[3.15]
  - Esta especificación pone como límite para los valores de pérdidas de vacío y a plena carga, que se mencionan en norma NMX-J-287-ANCE-1998, la cual como se ha analizado se ve afectada de manera significativa con la entrada en vigor de la NOM-002-SEDE/ENER-2012. Lo que implica que deberá ser modificada.

CANAME

SE
SECRETARÍA DE ECONOMÍA

CONCLUSIONES

No es posible realizar una comparación directa en los valores de eficiencia que se muestran en la NOM-SEDE-002-2010 y la NOM-002-SEDE/ENER-2012, puesto que la forma de obtener dicho valor se realiza por métodos diferentes tal como se observa en las formulas 3.2 y 3.2. Pero donde si es posible hacer un comparativo directo es en el valor de pérdidas eléctricas totales, pues como se observa en la tabla 3.4, el promedio general de reducción de pérdidas eléctricas esta alrededor de un 62 %, lo que implicaría una reducción significativa de los gases de efecto invernadero, si tomamos en consideración que el 30 % del total de la energía eléctrica producida en México es a través generación termoeléctrica con 53,126 Giga watt hora y con 18,158 Giga watt hora por generación carboeléctrica en el año 2011 [4].
Otro de los aspectos a destacar es prácticamente todas las normas mexicanas excepto la NMX-J-169-ANCE-2004 y las especificaciones de la comisión federal de electricidad, se verán afectadas con la entrada en vigor de la NOM-002-SEDE/ENER-2012.

CANAME

SE SECRETARÍA DE ECONOMÍA

REFERENCIAS

- NOM-SEDE-002-2010
- NOM-002-SEDE/ENER-2012
- Eleftherios I. Amoiralis1, Marina A. Tsili2, Pavlos S. Georgilakis1, and Antonios G. Kladas, Energy Efficient Transformer Life Cycle Costs and Environmental Externalities
- Selection Implementing"9 th International Conference Electrical and Utilization", October 2007
- http://sener.gob.mx
- NMX-J-285-ANCE-2005 TRANSFORMADORES TIPO PEDESTAL MONOFÁSICOS Y TRIFÁSICOS PARA DISTRIBUCIÓN SUBTERRÁNEA- ESPÉCIFICACIONES.
- NMX-J-287-ANCE PRODUCTOS ELECTRICOS – TRANFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN TIPO SUMERGIBLES, MONOFÁSICOS Y TRIFÁSICOS PARA DISTRIBUCIÓN SUBTERRÁNEA - ESPECIFICACIONES.
- NMX-J-116-ANCE TRANSFORMADORES Y AUTOTRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN Y POTENCIA – MÉTODOS DE PRUEBA.
- NMX-J-169-ANCE TRANFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN TIPO POSTE Y TIPO SUBESTACIÓN ESPECIFICACIONES.
- K0000-02 INSPECCIÓN POR MUESTREO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN (CFE).
- K0000-04 TRANFORMADORES MONOFÁSICOS TIPO PEDESTAL HASTA 100 KVA PARA DISTRIBUCIÓN SUBTERRÁNEA.
- K0000-07 TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS TIPO PEDESTAL DE 300KVA Y 500KVA PARA DISTRIBUCIÓN SUBTERRÁNEA.
- K0000-08 TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS TIPO PEDESTAL HASTA 225 KVA PARA DISTRIBUCIÓN SUBTERRÁNEA.
- K0000-05 TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS TIPO SUMERGIBLE DE 300KVA Y 500KVA PARA DISTRIBUCIÓN SUBTERRÁNEA.
- K0000-019 TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS TIPO SUMERGIBLE HATA 100KVA PARA DISTRIBUCIÓN SUBTERRÁNEA.
- K0000-022 TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS TIPO SUMERGIBLE HASTA 225 KVA PARA DISTRIBUCIÓN SUBTERRÁNEA.

CANAME

SE

SECRETARÍA
DE ECONOMÍA

Solicitud de Apoyo Programa para el Desarrollo de las Industrias de Alta Tecnología (PRODIAT)

II. Informe de identificación de las familias y productos que ameriten de un estudio focalizado de Vigilancia e Inteligencia Tecnológica Competitiva

CANAME

SE
SECRETARÍA DE ECONOMÍA

INFORME DE IDENTIFICACIÓN DE LAS FAMILIAS Y PRODUCTOS QUE AMERITEN UN ESTUDIO FOCALIZADO DE VIGILANCIA E INTELIGENCIA TECNOLÓGICA COMPETITIVA

I. La vigilancia Tecnológica

En la actualidad, debido al crecimiento exponencial de la producción científica y de las aplicaciones tecnológicas así como de los medios de! información, las empresas deben ser capaces de percibir las señales indicadoras de los cambios significativos en el exterior para poder mejorar la planificación estratégica, mantener la competitividad y aumentar la cultura innovadora.

De acuerdo con la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), la Vigilancia Tecnológica es un proceso organizado, selectivo y sistemático, para captar información del exterior y de la propia organización sobre ciencia y tecnología, seleccionarla, analizarla, difundirla y comunicarla, para convertirla en conocimiento con el fin de tomar decisiones con menor riesgo y poder anticiparse a los cambios

De manera puntual y estratégica, podemos señalar que Vigilancia Tecnológica es:

- Conocer las tecnologías emergentes que se están investigando, publicando o patentando en determinada área.
- Conocer la dinámica de las tecnologías, es decir, qué tecnologías se están imponiendo y cuáles quedaron obsoletas.
- Conocer las líneas de investigación y la trayectoria tecnológica llevadas a cabo por las principales empresas que compiten en el área.
- Reducción de riesgos de toma de decisiones, al conocer mejor donde vamos a posicionarnos con nuestras estrategias.
- Conocer la competencia, búsqueda de alianzas con nuevos socios o asesoramiento de expertos.

II. La clasificación de dispositivos y servicios Eléctricos en la Cámara Nacional de Manufacturas Eléctricas

La Cámara Nacional de Manufacturas Eléctricas (CANAME), agrupa a empresas fabricantes de equipo eléctrico y de servicios en el ramo. Para atender los distintos asuntos que son de interés para la competitividad de estas empresas, la Cámara ha organizado secciones, que no es otra cosa más que agrupar a las empresas en función del producto o servicio que fabrican o brindan a sus clientes.

Lo anterior permite atender por cada producto o familia de productos, las necesidades o temas de interés de las empresas, logrando ser muy focalizados, ya que, las empresas presentan distintas problemáticas en función de sus productos o servicios específicos, pudiendo ser en temas diversos como:

- Comercio exterior
- Normalización
- Legislación
- Innovación y Competitividad
- Compras de gobierno
- Entre otros

Por lo anterior, CANAME se ha organizado en las siguientes secciones:

SECCION I Motores, Motogeneradores, Generadores y Reductores

SECCIÓN II Transformadores y Reguladores de Voltaje

SECCIÓN III Iluminación, Balastros y Reactores, Lámparas, Luminarios y sus partes

SECCIÓN IV Sistemas de ahorro de energía y Generación de energía Renovable

SECCIÓN V Aparatos de control, de medida, seccionamiento y tableros

SECCIÓN VI Conductores Eléctricos

SECCIÓN VII Torres de Transmisión

SECCIÓN VIII Aparatos Electrodomésticos

SECCIÓN IX Aparatos Frigoríficos y Calefacción

SECCIÓN X Partes y componentes de equipo eléctrico

SECCIÓN XI Soldadoras y Punteadoras, Elevadores y Escaleras Eléctricas

SECCIÓN XII Integradoras de paquetes

SECCIÓN XIII Aparatos de Baja Tensión

SECCIÓN XIV Instaladores

III. La definición de dispositivos pertinentes para realizar un estudio de inteligencia y vigilancia tecnológica

Un estudio de vigilancia tecnológica, es una herramienta de alto valor para la toma de decisiones focalizadas y de alto impacto, por ello, al interior de la Cámara se analizó cuál o cuáles productos y servicios serían los más adecuados o relevantes para realizar un estudio de esta naturaleza. En otras palabras, se identificó, cuáles productos necesitaban por alguna razón relevante, la realización de este tipo de análisis, con el propósito de que los resultados del mismo, tuvieran el mayor impacto posible en el aumento de su competitividad, diseñando estrategias reactivas o proactivas que les permitieran posicionarse en el mercado.

Otros aspectos clave que se consideró para la definición de los productos o familias de productos que ameritaban la realización de un estudio de inteligencia, fueron los recursos disponibles y el tiempo necesario para realizar estos estudios y, considerando los recursos que gracias al PRODIAT y CANAME podrían destinarse, aunado al tiempo disponible para realizarlos, se llegó a la siguiente definición:

Luego de una exploración y reflexión interna con cada una de las secciones de CANAME, se logró el consenso de que la familia de productos que necesitaba urgentemente un análisis de vigilancia tecnológica, era la de TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN incluyendo las gamas más relevantes y que se encuentran reguladas en la NOM-002.SEDE-2010.

La razón fundamental de haber decidido realizar el estudio de vigilancia tecnológica para esta familia de productos, fue que, desde varios meses, la norma oficial mexicana que regula la fabricación y operación de estos productos (NOM-002-SEDE-2010), está en revisión con el objetivo de aumentar las exigencias de eficiencia energética para estos dispositivos.

Esta situación que es inminente, obliga de manera inmediata a que las empresas fabricantes de estos aparatos, modifiquen sus procesos y productos para fabricar transformadores más eficientes, lo que implica necesariamente la inclusión de nuevas tecnologías de proceso, materiales o producto.

Ante el cambio inminente de esta norma oficial que se espera entre en vigor el próximo año, las empresas se ven en la necesidad de conocer las tecnologías que en el mundo se están usando para la fabricación de transformadores eficientes y asimismo, es necesario que cuiden que al realizar nuevos desarrollos, no infrinjan derechos de propiedad intelectual por patentes concedidas a otras empresas.

Por lo anterior, fue evidente la imperiosa necesidad de iniciar de inmediato el estudio de vigilancia tecnológica para la familia de transformadores de distribución que contempla la NOM-002-SEDE.2010, que arrojara información estratégica para las empresas del sector, especialmente las PYMES, que les permita realizar nuevos desarrollos e innovaciones en transformadores, utilizando el conocimiento disponible, pero cuidando no infringir derechos de terceros por tecnologías protegidas en ese ramo industrial.

A continuación y con base en información oficial y pública dentro del sitio de la Comisión Federal de Mejora Regulatoria (COFEMER), se integran al presente análisis, algunos puntos clave relacionados con la justificación e importancia de la revisión y actualización de la NOM-002.SEDE-2010:

"JUSTIFICACIÓN

La presente propuesta representa beneficios notoriamente superiores a los costos al incrementar las eficiencias y disminuir las pérdidas en los transformadores de distribución. Lo anterior, se encuentra alineando con los objetivos del Plan Nacional de Desarrollo en cuanto a la práctica de contribuir con aplicaciones encaminadas en la eficiencia energética, que permitirán alcanzar la disminución a la afectación al medio ambiente debidas a las emisiones de CO2 a la atmósfera. Las modificaciones propuestas se traducen en un incremento promedio de 0.32 puntos porcentuales de la eficiencia, correspondiente a una disminución del orden del 38 por ciento de las pérdidas totales en transformadores de distribución monofásicos y trifásicos permitiendo que los fabricantes mejoren su competitividad en sus diseño de los equipos (Núcleo acero amorfo y acero al silicio, así como conductores Cobre y Aluminio entre otros) y disminuye las pérdidas totales. Las nuevas eficiencias propuestas se obtienen a precios

competitivos de acuerdo a los resultados de los trabajos realizados con los fabricantes representados por la Cámara Nacional de Manufacturas Eléctricas (CANAME). Se incorpora dentro de la Norma Oficial Mexicana el Procedimiento de Evaluación de la Conformidad, lo que se traduce en una importante adición debido a que la actual NOM no tiene un procedimiento de evaluación de la conformidad. Con dicho procedimiento se permitirá comprobar el grado de cumplimiento de esta NOM. Asimismo, se adiciona anexo 4 "Aspectos a considerar como Requisitos de Seguridad para transformadores de Distribución" lo que permite contar con un documento mucho más completo en cuanto a aspectos de seguridad y con valores de eficiencia energética superiores a los establecidos en la NOM vigente.

1. Describa los objetivos generales de la regulación propuesta.

Actualizar la norma oficial mexicana NOM-002-SEDE-2010, "Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 15 de diciembre de 2011, con la finalidad de proporcionarle al consumidor transformadores más seguros y eficientes. Se actualizan diversas definiciones y especificaciones que se encuentran dentro del texto de la NOM vigente, con el propósito de hacerlas más precisas y sobre todo congruentes con las actividades llevadas a cabo por los fabricantes de transformadores. Se propone: a) Incrementar la eficiencia mínima y la disminución de valores máximos de pérdidas totales permitidas para los transformadores de distribución como resultado de cambios en la fórmula para el cálculo de eficiencias y la consideración de un factor de carga real del 80%. b) Eliminar los transformadores monofásicos de 5 KVA en las tensiones de 15, 25, 34.5 kV de las tablas 1 y 2, ya que los beneficios operativos del equipo de 10 KVA son mayores, contra su costo marginal. La presente propuesta considera un incremento promedio de 0.32 puntos porcentuales de la eficiencia, correspondiente a una disminución del orden del 38 por ciento de las pérdidas totales en transformadores de distribución monofásicos y trifásicos (véase anexo 1), permitiendo que los fabricantes mejoren su competitividad en sus diseño de los equipos (Núcleo acero amorfo y acero al silicio, así como conductores Cobre y Aluminio entre otros) al limitar las pérdidas totales, considerando cambio en la fórmula del cálculo para obtener la eficiencia y con un factor de corrección para las pérdidas de carga debidas a temperatura de 70 °C y un factor de carga real del 80%. Las nuevas eficiencias propuestas se obtienen a precios competitivos de acuerdo a los resultados de los trabajos realizados con los fabricantes representados por la Cámara Nacional de Manufacturas Eléctricas (CANAME) (véase anexo 2). El impacto estimado que se tendría por el incremento de las eficiencias, en el costo de los transformadores es en promedio del 28% de los costos actuales. Del anteproyecto se eliminan la utilización de los transformadores de distribución monofásicos de 5 kVA en las tensiones de 15, 25 y 34.5 kV en las tablas 1 y 2, esto debido a que los equipos de 10 kVA tienen mayores beneficios operativos en comparación con los de 5 kVA y la diferencia en costo no rebasa el 5% permitiendo tener menor número de inventario, menor riesgo de falla y duplicar la capacidad disponible para incrementos de carga. Al incrementar las eficiencias y disminuir las pérdidas en los transformadores de distribución se está alineando con los objetivos del Plan Nacional de Desarrollo en cuanto a la práctica de contribuir con aplicaciones encaminadas en la eficiencia energética, que permitirán alcanzar la disminución a la afectación al medio ambiente debidas a las emisiones de CO2 a la atmósfera, (véase anexo 3). Se incorpora dentro de la Norma Oficial Mexicana el Procedimiento de Evaluación de la Conformidad, lo que se traduce en una importante adición debido a que la actual NOM no tiene un procedimiento de evaluación de la conformidad. Con dicho procedimiento se permitirá comprobar el grado de cumplimiento de esta NOM. Asimismo, se adiciona anexo 4 "Aspectos a considerar como Requisitos de Seguridad para transformadores de Distribución" lo que permite contar con un documento mucho más completo en cuanto a aspectos de seguridad y con valores de eficiencia energética superiores.

II. Justifique las razones por las que la regulación propuesta es considerada la mejor opción para atender la problemática señalada.

Establece parámetros de eficiencia y seguridad acordes con los adelantos tecnológicos que se tienen actualmente. 2. Incorpora una herramienta para que el sector de la administración pública dígase Comisión Federal de Electricidad, en sus procesos de licitación adquiera mejores transformadores de distribución, cuando sea el caso. 3. Proporciona a los particulares que requieran de un transformador, la certeza de que cualquier equipo que se oferte en el mercado cumple con una mayor eficiencia energética y seguridad. 4. La autoridad competente contará con una mejor norma que contribuya a la seguridad de las instalaciones eléctricas. 5. El suministrador del servicio público de energía eléctrica tendrá elementos para exigir y asegurar que los transformadores de distribución que se integren al sistema eléctrico nacional sean más eficientes y confiables.

CONCLUSIONES

I. El cambio en la NOM-002-SEDE-2010, impactará de manera importante en la competitividad de todas las empresas nacionales fabricantes de la familia de transformadores de distribución, obligándolos a desarrollar o incorporar nuevas tecnologías que les permitan ser más eficientes desde el punto de vista energético.

II. Los empresarios han iniciado la búsqueda de tecnologías pertinentes en cada uno de sus procesos de manufactura, por lo que un estudio de vigilancia tecnológica que les oriente en las nuevas tecnologías que podrían desarrollar o incorporar en este cambio tecnológico, resulta estratégico.

III. Adicionalmente, el estudio en comento es clave para evitar infringir derechos de terceros por el uso de tecnologías protegidas por patente.

IV. Por lo anterior, se definió realizar un estudio de inteligencia competitiva y vigilancia tecnológica en la familia de transformadores de distribución eléctrica, ya que impactará directamente en la competitividad de las empresas dedicadas a la manufactura de estos dispositivos, ayudándoles de manera decisiva a enfrentar el cambio tecnológico obligatorio que impone la actualización de la NOM-002-SEDE-2010.

ESTADO DEL ARTE DE LAS PÉRDIDAS EN TRANSFORMADORES

En este apartado se presenta un estudio amplio de los trabajos de investigación actuales sobre el problema de las pérdidas del transformador, desde el punto de vista de la aplicación de la ingeniería práctica. Revela que el problema de las pérdidas del transformador sigue siendo un área de investigación activa. En este capítulo se clasifica el problema de las pérdidas del transformador en tres grupos principales: (a) las pérdidas en tanques debido a la alta corriente de las boquillas de baja tensión, (b) las pérdidas en la zona de entrehierros del núcleo del transformador y (c) las pérdidas parásitas en el tanque del transformador y se basa en más de 50 artículos publicados. Todos los trabajos son sistemáticamente clasificados. Los métodos, el tamaño de los transformadores, y otros aspectos relevantes en los diferentes artículos se discuten.

INTRODUCCION

Hay muchos retos cuando se diseña un transformador: a) prevenir a los transformadores de altas temperaturas, b) proporcionar suficiente aislamiento y diseñar los transformadores para que resistan las condiciones de voltajes transitorios, c) fabricar los transformadores con bajas pérdidas, d) reducir el tiempo de fabricación de los de los transformadores, f) Minimizar el costo evaluado de los transformadores, g) minimizar el ruido producido por los transformadores entre otros. Este capítulo está dedicado al problema de diseño c). Este problema es crítico porque con el aumento continuo del consumo global de energía eléctrica, existe la necesidad de mejorar la eficiencia de los transformadores [4.1]. Los transformadores de baja eficiencia afectan al medio ambiente, ya que requieren más generación de energía para suministrar mayores pérdidas. Esto provoca más emisiones de dióxido de carbono, que contribuye al llamado efecto invernadero. Por otra parte, la eficiencia energética transformadores de alta eficiencia de reducir los requerimientos de generación y la contaminación del aire.

El presente documento contiene una revisión de cerca de 20 artículos, que se han ocupado de problema de las pérdidas de transformadores en diferentes aspectos, desde el punto de vista de cálculo, medición y reducción. Las pérdidas principales del transformador se pueden clasificar como: (a) las pérdidas en tanques debido a la alta corriente de las boquillas de baja tensión, (b) las pérdidas en las zonas de entrehierros del núcleo, y (c) las pérdidas parásitas en el tanque del transformador. En la parte final, el se investiga diferentes aspectos relacionados con los artículos publicados, tales como: (a) ¿Quién hace más investigación en las pérdidas del transformador: la universidad o la industria, (b) ¿es más común ver la aplicación de la reducción de pérdidas en los transformadores de distribución o de potencia,? (c) ¿Cuál es el método preferido para estudiar el problema de la pérdida del

transformador?, (d) ¿Qué continente hacer más investigación en las pérdidas del transformador?, (e) ¿cuál es el enfoque más común en el estudio de las pérdidas del transformador: experimental o numérico?, (f) ¿Tienen más presencia las simulaciones en 2D sobre simulaciones 3D?

Reducciones pequeñas en las pérdidas producen un importante ahorro energético, ya que el número de transformadores en los sistemas de potencia es alto. Se ha encontrado que si la longitud de traslape de un transformador de 37.5 kVA se reduce de 2 cm a 1 cm, entonces este cambio de diseño reduce las pérdidas sin carga en 6.43 W [4.1]. Si esta reducción de pérdidas de 6.43 W se aplicar a los 50, 000,000 transformadores en EE.UU., durante la vida útil de 30 año del transformador, se obtiene: (50,000,000 transformadores)*(6.43 W)* (8.760 horas / año)*(30 años) = 84490200000 kWh de ahorro de energía. Este ahorro de energía es significativo ya que es 85,000 veces el consumo eléctrico anual promedio de un fabricante del transformador típico mexicano, que fabrica anualmente 20,000 transformadores. El lector interesado en más detalles acerca de esta reducción de las pérdidas del transformador puede consultar [4.2]. En nuestros proyectos de investigación hemos utilizado algunas formas de reducir las pérdidas del transformador de distribución transformador [4.2] - [4.11].

Si se aplica la reducción de pérdidas de 643 W a la reducción de las emisiones, los resultados se muestran en la Tabla 4.1, donde se pueden observar las cantidades significativas de reducción de contaminación. Este es un beneficio tangible para la compañía y sus clientes, y debe tenerse en cuenta al evaluar las ventajas de esta mejora en el diseño del transformador.

Tabla 4.1. Reducción de emisiones típica en toneladas métricas durante la vida útil de 30 años del transformador

	Generación reducida sólo a las plantas de vapor a carbón	Generación reducida sólo en las plantas de turbinas de combustión con destilación de petroléo
CO_2	63756304,9	49866116
SO_x	1275126,1	54918,63
NO_x	339481,624	252625,698

PERDIDAS EN EL TANQUE DEBIDO A LAS BOQUILLAS DE ALTA CORRIENTE

Existen pocos estudios relacionados con un conductor que lleve corriente en presencia de las superficies permeables conductoras. Medios para prevenir un sobrecalentamiento local en los devanados y otros elementos de los transformadores se han estudiado, pero los medios para evitar el sobrecalentamiento en la estructura circundante a las boquillas de baja tensión de transformadores de distribución son muy escasos.

En 1954, Poritsky y Jerrard [4.12] discutieron las pérdidas por corrientes parásitas en un bloque sólido semiinfinito sujeto a una corriente alterna mediante la resolución de las ecuaciones de Maxwell, tanto en el aire y en el sólido conductor. En el caso de tanques de transformadores, el espesor de la placa de acero es mayor que la profundidad de penetración a bajas frecuencias de tal forma que el tanque se comporta esencialmente como un bloque sólido semi-infinito. La saturación se despreció al asumir la permeabilidad como constante. Las ecuaciones de Maxwell se resuelven por superposición integral de Fourier.

Deuring, [4.13], escribió un artículo en 1957 sobre el problema de los conductores portadores de corriente cerca de superficies conductoras. En ese momento, las conexiones de corriente elevada, podrían llevar a más de 6000 A rms. El autor presenta ecuaciones empíricas para el cálculo de las pérdidas, encontrando que las pérdidas inducidas en tanques de transformadores de gran potencia varían con la corriente a una potencia inferior a dos al considerar materiales de placa de acero magnético sin blindaje. Deuring determinó curvas de watts por pie para placas sin blindaje y también para placas con blindadas.

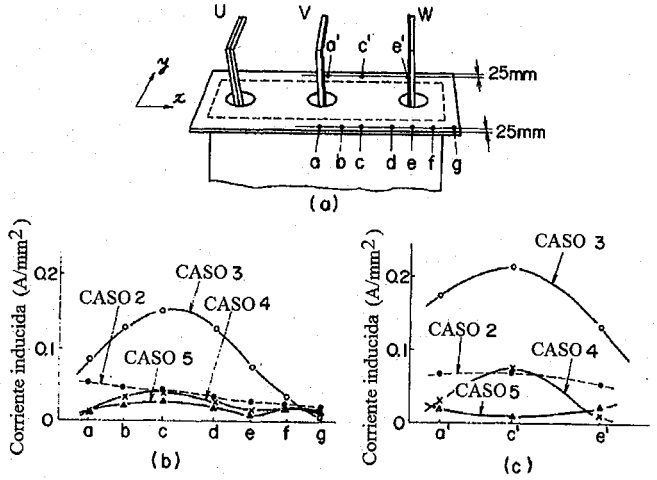


Fig. 4.1. Variaciones en la distribución de corrientes inducida en el blindaje de cobre: (a) las posiciones de medición, (b) componente x medida en el nivel 1, (c) componente z medida en el nivel 2. Derechos de autor IEEE, (Saito et al., 1981 [4.13]).

En 1981, Saito et al., [4.14], presentaron un análisis experimental de corrientes inducidas en la estructura que rodea a las boquillas de gran corriente de transformadores. Se utilizó un modelo con un corriente de alrededor de 20 kA. La densidad magnética en la cubierta del tanque y la brida de la cubierta fue menor de 0.001 T. Por lo tanto, no había ninguna posibilidad de que el flujo disperso provoque un sobrecalentamiento local. La componente x de las corrientes inducidas que aparecen a lo largo de los bordes de la placa base de la boquilla se comparan en la Fig. 4.1.

1988, Furman et al., [4.15], trataron con pérdidas por corrientes parásitas y calentamiento local en las partes tanque del transformador mediante el uso de derivaciones de alta corriente. Los experimentos de este trabajo se realizaron en un modelo a escala, que representa la tapa del tanque de un transformador 1000 MVA. Los autores presentaron varios métodos con el fin de reducir las pérdidas en tanques de transformador, algunos de ellos son: (a) incremento de la distancia entre el conductor de alta corriente y la superficie de la cubierta, (b) la conexión de los conductores de los devanados directamente a las boquillas correspondientes para evitar secciones paralelas a los derivaciones de la cubierta del tanque, (c) Disposición cercana de las derivaciones de fase diferentes, (d) la utilización de materiales conductores no magnético, (e) la división de un conductor de alta corriente en conductores paralelos, (f) selección de una posición óptima de la derivación y el agujero en la tapa del tanque.

En 1990, Renyuan et al., [4.16], presentaron un método de la ecuación integral para determinar las pérdidas por corrientes por corrientes circulantes producidas por corrientes elevadas de los conductores del transformador. Este método puede ser utilizado para obtener la solución de la región abierta y las condiciones de frontera que se tienen en cuenta inherentemente por este enfoque. El método se aplica para calcular los campos sinusoidales de corrientes de circulantes en tres dimensiones suponiendo: (a) la conductividad constante, (b) materiales magnéticos isotrópicos, y (c) corriente de excitación sinusoidal. Asimismo, este artículo presenta un estudio paramétrico de varios factores, que incluyen: (a) materiales del tanque, (b) la distribución de conductores de baja tensión, (c) valores de corriente diferentes y (d) simulaciones con y sin blindajes.

En otro trabajo, Renyuan et al. [4.17], se aplicaron el método de elemento frontera en términos del potencial vectorial magnético y el potencial escalar eléctrico encontrando que el sobrecalentamiento más grave se produjo entre las boquillas de baja tensión. La máxima densidad de flujo magnético considerada fue 22 mT. En este papar, se asume que la corriente de excitación varía de forma sinusoidal con el tiempo.

En 1994, Junyou et al., [4.18], aplicaron el método de elemento frontera para el problema del sobrecalentamiento debido a las altas corrientes de los conductores en

un transformador de 360 MVA-500 kV. Los autores calcularon la densidad de pérdidas de corrientes inducidas en la superficie de la cubierta del transformador. La pérdida total fue de 2.62 kW y las pérdidas superficiales máximas fueron de 6.1 kW/m^2. Se puede observar a partir de los resultados de este artículo que los materiales no magnéticos con pantalla de aluminio son favorables para evitar el sobrecalentamiento de la cubierta.

En 1997, Turowski et al. [4.19] llevaron a cabo un análisis por computadora, basado en las ecuaciones de Maxwell y fórmulas cerradas de las boquillas de alta corriente que pasan a través de las placas de cubierta de acero. El método de cálculo de las pérdidas por corrientes parásitas en las paredes de acero se basa en el teorema de Poynting. Los autores obtuvieron una fórmula para la corriente máxima permisible de la boquilla en la cubierta del tanque. Cuatro casos fueron simulados: (a) una cubierta plana con boquillas trifásicas sin espacios entre agujeros, (b) como (a), pero con insertos de metal no magnético, (c) como (a), pero con torretas de metal, y (d) como (b), pero con torretas metálicas. La fórmula para las pérdidas de la cubierta obtenida por Turowski está dada por:

$$A_p = m \cdot 5.5 \cdot 10^{-3} \cdot I \cdot A \cdot \left(1 + 0.0112 \frac{I}{D}\right) \qquad (1)$$

donde m = 1 o $\sqrt{3}$ para transformadores monofásicos o trifásicos, respectivamente, D es el diámetro de la torreta, A es la distancia de la torreta. En la fig. 4.2 se muestra la distribución de campo en la superficie de la cubierta de acero.

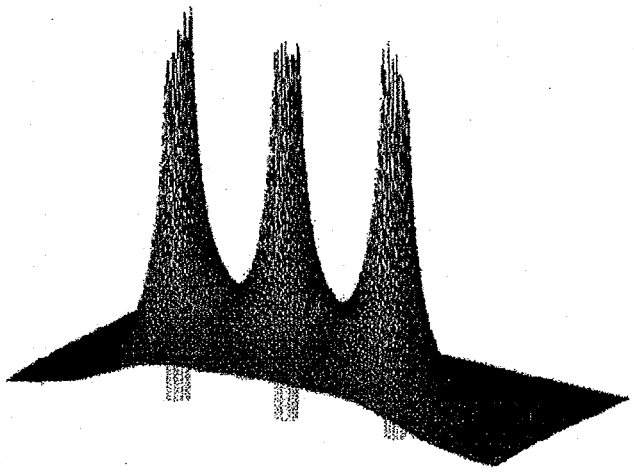


Fig. 4.2. Distribución del campo magnético en la tapa de acero del transformador. Derechos de autor IEEE, (Turowski et al., 1997 [4.18])

En 1999, Kim et al., [4.20], presentaron un diseño mejorado de las placas de la cubierta para reducir las pérdidas por corrientes parásitas debidas a las corrientes elevadas que pasan a través de las placas de acero de la cubierta del transformador. Los autores utilizaron el método de la ecuación integral del frontera indirecta para el problema de las corrientes de elevadas en los conductores del transformador y compararon los resultados calculados y experimentales. La placa de la cubierta

mejorada del transformador se componía de dos ranuras entre los orificios de los conductores de corriente. En este caso, las pérdidas por corrientes parásitas se redujeron en un 25% en comparación con el caso cuando no hay ranuras en la cubierta (Fig. 4.3).

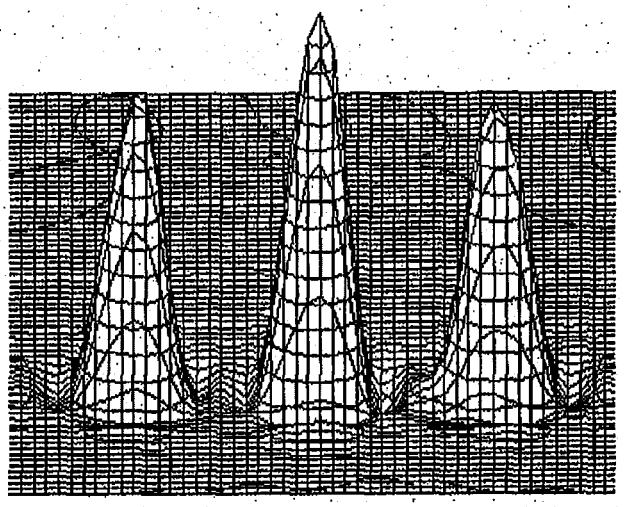


Fig. 4.3. Distribución de densidad de pérdida de potencia en la superficie de las placas de cubierta para el modelo donde no hay ranuras. Derechos de autor IEEE, (Kim et al., 1999 [4.19]).

UNIONES DEL NÚCLEO DEL TRANSFORMADOR

En 1973, Jones et al., [4.21], establecieron que la eficiencia de núcleos de transformadores de gran potencia depende del tipo de uniones de las esquina utilizadas en la unión entre los yugos y las piernas. Las regiones, donde el flujo se desvía de la dirección del rolado son las esquinas donde el flujo pasa desde el yugo a las piernas. Dos núcleos de material de grano orientado fueron construidos con uniones de traslape a 45°. La longitud de traslape en el núcleo varió y los efectos sobre las pérdidas de potencia se determinó. Los autores mostraron la relación entre las pérdidas y la longitud del entrehierro. La conclusión fue que las pérdidas aumentan linealmente conforme la longitud del entrehierro se incrementa en el rango estudiado. Pérdidas mínimas se registraron utilizando traslapes entre 0.4 y 0.6 cm.

En este artículo el núcleo fue construido y desmantelado varias veces para comprobar la repetibilidad de las mediciones de pérdidas a 1.5 T. Traslapes grandes se utiliza para añadir resistencia mecánica a las uniones del núcleo.

En 1982, Nakata et al., [4.22], analizaron las características magnéticas de los núcleos con uniones traslapadas utilizando el método de elementos finitos. Los autores obtuvieron resultados útiles y sugirieron que el aumento del número de laminaciones por grupo aumenta las pérdidas del núcleo. También encontraron que si el número de laminaciones por grupo es pequeño, el efecto de la longitud del

entrehierro en las características magnéticas es significativo.

En 1992, Valkovic et al., [4.23], compararon las pérdidas con uniones convencionales y con uniones traslapadas. Se encontró que una reducción de las pérdidas en el núcleo entre un 2 y 4.4% se obtuvo con uniones traslapadas. Todos los modelos del núcleo fueron ensamblados con 120 laminaciones por pila y el material del núcleo fue acero eléctrico de grano orientado eléctrica.

En 1994, Löffler et al., [4.24], encontraron que las pérdidas se incrementaron debido a los entrehierros, las pérdidas no son una función simple de la longitud media, sino también de la distribución local de los entrehierros. Pérdida mucho más altas se puede esperar de las entrehierros concentrados regionalmente.

En 1994, Pfützner et al., [4.25], encontraron que la permeabilidad μ_z de la lámina de acero es un parámetro clave para la no homogeneidad de la densidad magnética. Inhomogeneidades locales tienden a afectar el circuito magnético completo. Entrehierros en las regiones de traslape pueden causar densidades magnéticas locales en "z" de un orden de 0.2 T.

En 1996, Pietruszka et al., [4.26], presentaron un método que toma en cuenta las zonas de traslape en los núcleos apilados de transformadores durante los cálculos de campo magnético. El método utiliza un reluctividad equivalente homogeneizada de toda la estructura y la densidad de flujo en sus capas. En los cálculos del campo magnético en el núcleo del transformador, la laminación y los traslapes se desprecian. En este artículo, la distribución del campo magnético se obtiene resolviendo un sistema de ecuaciones no lineales en términos de elementos finitos.

En 1998, Elleuch et al., [4.27], presentaron una fase de tres lumped circuito un modelo de transformador de circuito concentrado trifásico que toma en cuenta los entrehierros, la saturación, las pérdidas del núcleo y la anisotropía de la laminación. Las líneas de flujo permanecen casi paralelas a la dirección de laminado, excepto en un área pequeña alrededor de las uniones. Con el fin de tener en cuenta este efecto de anisotropía, los yugos de transformadores y las piernas se dividen en elementos longitudinales de acuerdo con la dirección del rolado.

En 1998, Girgis et al. [4.28], presentaron resultados experimentales sobre los efectos de la calidad del núcleo, la unión y la presión de sujeción en las perdidas en el núcleo del transformador y la corriente de excitación. Los efectos fueron estudiados para diferentes grados de materiales de núcleo y para núcleos monofásicos y trifásicos. Los autores mostraron que el número de pasos por grupo y el número de laminaciones por paso afectan significativamente el factor de la destrucción. Ellos mostraron que las dimensiones de los entrehierros de las uniones de los núcleos aumentar las pérdidas en el núcleo y la corriente de excitación en los núcleos trifásico sin traslapado.

En 2000, Nyenhuis et al. [4.29], presentaron cálculos de pérdidas en el núcleo y las distribuciones de flujo para unidades tipo núcleo para cinco y una pierna utilizando el método de diferencias finitas en 2D. Los autores determinaron la densidad de flujo en diferentes tipos de núcleo, la distorsión armónica para diversos tipos de núcleo y la distribución de flujo espacial a través de las laminaciones del núcleo. Por último, los autores compararon las mediciones y los resultados calculados.

In 2000, Mechler et al.,□, presented a study to understand the role of joints in transformer losses. The authors used the finite element method for magnetic field calculations without considering the whole lamination package, which consisted of several hundreds of laminations due to periodical repetition of the sheet pattern. The joint gaps cause local disturbances of flux density. Without gaps, the flux density inside the sheets would be more uniform. The authors showed curves of flux distribution versus material grades and joint parameters.

En 2000, Mechler et al., [4.30], presentaron un estudio para entender el papel de las uniones en las pérdidas del transformador. Los autores utilizaron el método de elementos finitos para los cálculos de campo magnético sin considerar el paquete de laminación completo, que consistía en varios cientos de láminas debido a la repetición periódica del modelo de la laminación. Los entrehierros causan perturbaciones locales de la densidad de flujo. Sin entrehierros, la densidad de flujo en el interior de las laminaciones serían más uniformes. Los autores mostraron curvas de distribución de flujo contra grados de material y parámetros de las uniones.

PÉRDIDAS PARASITAS EN EL TANQUE DEL TRANSFORMADOR

En 1954, Vogel et al. [4.31], propusieron un modelo para determinar las pérdidas parásitas y el calentamiento de tanques para un transformador tipo núcleo. Los autores obtuvieron una expresión analítica para determinar las pérdidas en el material magnético cuando la profundidad de penetración es conocida. Las pérdidas por corrientes parásitas varían directamente con la raíz cuadrada de la resistividad para placas de hierro gruesas y varian inversamente con la resistividad para placas delgadas. Un tanque de forma ovalada se considera en el presente artículo y las pérdidas en la pared del tanque contra la distancia para la parte superior de las bobinas de alta tensión se determinan.

En 1959, Agarwal, [4.32], desarrollo fórmulas para el cálculo de las corrientes inducidas en hierro macizo y laminado. El autor explicó muy claramente lo que ocurre cuando la profundidad de penetración es menor o mayor que el grosor medio de la placa. El autor utilizó las ecuaciones de Maxwell y asumió una curva de magnetización ideal con el fin de obtener las pérdidas por unidad de área. Agarwal

comparó los valores experimentales y calculados de las pérdidas por corrientes inducidas para laminaciones de 1, 1/4, 1/8, y 1/16 pulgadas. Las pérdidas por histéresis se calcula para todos los puntos de prueba y se encontró que son menores del 4-5% para las laminaciones de 1/16 de pulgada para valores bajos de frecuencia y fuerza magnetomotriz.

En 1966, Mullineux et al., [4.33], presentaron un método para determinar la densidad de corriente inducida y el flujo del tanque de un transformador con cualquier número de devanados y distribución de vueltas. En la solución, se supone que el tanque y el núcleo son de permeabilidad infinita. Los autores obtuvieron una solución como función de integrales y series.

En 1966, Berezovskii et al., [4.34], determinaron las pérdidas parásitas totales de la componente tangencial del campo magnético en la superficie interior del tanque y de la resistencia superficial del material del tanque. Los autores encontraron que cualquier cálculo del campo electromagnético o las pérdidas debidas a corrientes parásitas en cuerpos ferromagnéticos se complica por el hecho de que la permeabilidad del material depende del campo magnético mismo. En este trabajo, los autores calcularon las pérdidas superficiales en los cuerpos ferromagnéticos usando una permeabilidad equivalente.

En 1972, Kozlowski et al., [4.35], presentaron principios para la selección del tipo y espesor de tanques utilizando fórmulas analíticas. Los autores presentaron una fórmula analítica para determinar las pérdidas de potencia en los tanques sin blindados. También evaluaron la potencia máxima por encima del cual las pérdidas de tanques crecen tan rápidamente que el blindaje es indispensable. Este límite varía de 30 a 50 MVA en función de la reducción deseada de pérdidas en tanques. Cuando los blindajes se aplican, las pérdidas del tanque sin blindaje debe ser multiplicado por un coeficiente analítico, que depende de la conductividad del cobre o de aluminio, los parámetros del acero, y el grosor del blindaje. Los autores mostraron que las pérdidas mínimas aparecen en un arreglo blindado utilizando los siguientes espesores del blindaje: $d_{Cu} \geq 10mm$ and $d_{Al} \geq 12.4mm$. Cuando derivaciones magnéticas se aplican, las pérdidas del tanque sin blindaje debe ser multiplicado por un coeficiente empírico, que depende del número de hojas que componen el espesor de la derivación.

En 1973, Allan et al., [4.36], presentaron fórmulas para el cálculo de las pérdidas locales debidas a las corrientes parásitas en los tanques de aluminio causadas por conductores cercanos portadores de corriente o por el flujo disperso de los devanados. En esta formulación, la corriente sinusoidal fluye paralela al núcleo y al tanque. Los autores obtuvieron las fórmulas de las ecuaciones de Maxwell para todas las regiones del transformador (la región fuente, la región tanque y la región de aire) aplicando una transformada coseno infinito. A partir de estas ecuaciones, se calcularon las pérdidas (en watts/ metro) causadas por conductores que llevan corriente cercanos.

En 1973, Inui et al., [4.37], utilizaron un transformador de 1500 MVA para examinar los efectos del tanque y los blindajes del tanque sobre los campos magnéticos en los devanados mediante usando un tanque sin blindaje, un tanque con laminaciones de acero al silicio y un tanque con blindaje de láminas de aluminio. Los autores calcularon la distribución de densidad de flujo magnético en las bobinas usando la ecuación de Biot-Savart en 2D.

En 1977, Napoli et al., [4.38], dimensionaron el blindaje en un autotransformador monofásico de 100/3 MVA utilizando el método de elementos finitos. Los autores representaron la densidad máxima del blindaje como una función del grosor, las distancias desde devanados y la distribución radial y axial de la densidad magnética para un transformador biconcentrico.

En 1980, Valkovic, [4.39], presentó un método analítico para el cálculo de las pérdidas parásitas en tanques de transformadores trifásico. El autor asume en este cálculo que (a) el núcleo tenía permeabilidad infinita y es del tipo de tres piernas, (b) el espesor de la pared del tanque es varias veces mayor que la profundidad de penetración, (c) la no linealidad y la histéresis fueron tomadas en cuenta, y (d) todas las cantidades electromagnéticas varían sinusoidalmente con el tiempo. Las pérdidas en el tanque se calcularon mediante el teorema de Poynting. Las pérdidas en tanques fueron influenciados por la geometría de la bobina, es decir, la disposición espacial de los ampere-vueltas, si el devanado de alta tensión es más corto que devanado de baja tensión.

En 1984, Kazmierski et al., [4.40], evaluaron métodos para la reducción del calentamiento. El sobrecalentamiento local de la pared del tanque originado por conductores de corriente de alta intensidad se presentó y diversos métodos de blindaje también se discutieron. La posición de los shunts magnéticos determina si las fuerzas axiales y las pérdidas adicionales en el borde de los devanados se reducen o provocan una concentración adicional campo de dispersión sobre la superficie del núcleo y el tanque. Los autores mostraron cómo la temperatura se relaciona con (a) la pared del tanque sin blindaje (b) tanque cubierto con una lámina de cobre de 3 mm, (c)cubierta parcia por una hoja, y (d) la pared del tanque parcialmente cubierta por dos shunts magnéticos no saturados de las laminaciones del transformador, situados bajo los conductores.

En 1987, Szabados et al., [4.41], proposieron un método análitico para predecir las pérdidas por corrientes inducidas en las paredes de transformadores de gran potencia. El método requiere sólo los valores de la densidad de flujo incidente sobre la superficie de la pared. Este valor se puede obtener utilizando programa computacionales o por medios experimentales. El artículo describe cómo el flujo incidente puede ser analíticamente representado mediante ajuste del error medio a una serie de Fourier doble con el fin de producir los valores de pérdidas en la placa.

En 1988, Harrison et al. [4.42], describió cómo los diseñadores de transformadores han reducido tanto las pérdidas de carga y sin carga. El diseñador transformador, con el esfuerzo mínimo, ha sustituido los diferentes tipos y grados de acero en los núcleos de los transformadores, lo que resulta en la reducción de pérdidas sin carga. Los autores mostraron que las pérdidas de carga se redujeron de 2300 kW a 1150 kW de 1964 a 1985 para un transformador de 600 MVA. Los autores describen las técnicas principales para reducir las pérdidas parásitas, uno de ellas implica el rechazo del flujo disperso y la otra involucra la colección del flujo disperso. Se simuló la distribución del flujo disperso con y sin control de flujo.

En 1988, Komulainen et al. [4.43], reportaron resultados de las pérdidas parásitas en un tanque de transformador trifásico cuando está sin blindaje. La aplicación del blindaje requiere el conocimiento de la distribución de la pérdida parásitas en el tanque del transformador. El tanque es el más importante, ya que este alberga una proporción considerable de las pérdidas parásitas. Los autores determinaron las pérdidas del tanque sin blindados de las pérdidas de carga entre los transformadores con blindaje y sin blindaje. Los autores concluyeron que las laminaciones de acero núcleo ofrece un tanque más económico que el blindaje de aluminio en todos los transformadores.

En 1991, Namjoshi et al., [4.44], trató con el blindaje de corrientes parásitas de estructuras de acero, que rodean los cables de gran corrientes. Los anillos de cobre en cortocircuito, enrollados estrechamente alrededor de la estructura, se utilizaron como blindajes de corrientes inducidas. Los autores realizaron un estudio paramétrico examinando la sección transversal del anillo, el número de anillos, la frecuencia y la permeabilidad.

En 1992, Holland et al., [4.45], calculó las pérdidas parásitas en un 90 MVA, 3-fases, 132/33 kV del transformador utilizando un método de impedancia superficial mezclada con elementos finitos. Este método permite el cálculo de las pérdidas parásitas en los transformadores de gran potencia. Los autores determinaron las pérdidas parásitas en el tanque con y sin derivaciones. Los componentes de aluminio no se puede modelar usando impedancias de superficie ya que la profundidad de la piel es demasiado gruesa. Por lo tanto, el procedimiento utilizado para representar todo el transformador es el uso de un modelo sólido, donde los componentes sólidos se consideran con elementos de superficie, la eliminación de los elementos sólidos dentro.

In 1993, Pavlik et al., □, calculated winding eddy-current losses, stray losses in the tank walls, in the core support frame, in the lockplates, and in the core laminations of core-type transformers using a finite element model. The authors presented a series of stray loss reduction studies, leading to changes of structural elements that affect the stray and eddy current losses. They made three kinds of studies: topological

changes, shielding and sensitivity analyses. Three topological changes were studied out: (a) the addition of a wound pressure ring, (b) moving the frame axially away from the pressure ring, and (c) the changes in the positions of the end frame.

En 1993, Pavlik et al., [4.46], calcularon las pérdidas inducidas en los devanado, las pérdidas parásitas en las paredes del tanque, en el marco de soporte de núcleo, en las placa seguro, y en las laminaciones del núcleo de transformadores tipo núcleo utilizando el método de elemento finito. Los autores presentan una serie de estudios de reducción de pérdidas parásitas, llevando a cambios de los elementos estructurales que afectan a las pérdidas corrientes parásitas y Foucault. Se realizaron tres tipos de estudios: los cambios topológicos, blindaje y análisis de sensibilidad. Tres cambios topológicos Se estudiaron: (a) la adición de un anillo de presión de la herida, (b) mover el marco del axialmente alejándose del anillo de presión, y (c) los cambios en las posiciones de la estructura terminal.

En 1993, Guérin et al. [4.47], trataron el modelado electromagnético en 3D de las corrientes pérdidas parásitas en tanques de transformadores. En este trabajo, un transformador 390 kVA se utilizó. Los problemas de mallado se presentaron cuando la profundidad de penetración es pequeña en relación a las dimensiones de las regiones conductoras sólidas. Esto ocurre cuando la permeabilidad, la conductividad o la frecuencia son elevadas. Los autores realizaron varios análisis paramétricos, cambiando la permeabilidad relativa del tanque, el espesor del tanque, y la permeabilidad relativa del núcleo magnético. En todos los casos, se determinó que las pérdidas por corrientes inducidas (ver fig. 4.4).

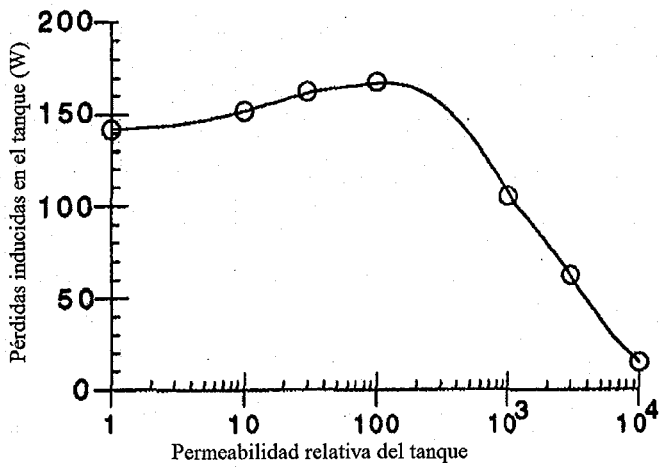


Fig. 4.4. Pérdidas corrientes inducidas contra la permeabilidad del tanque. Derechos de autor IEEE, (Guérin, et al., 1993 [4.47]).

En 1993, O'Connor, [4.48], determinó el campo magnético de un transformador de 80-kVA sin carga, a corriente a plena carga y a diferentes distancias del tanque. El campo magnético varía desde 3200 hasta 8.0 miligauss a cero y 3 pies de distancia, respectivamente. Se supone que los polos transformadores montados en el poste

están muy lejos de la vida humana, pero se utilizan a menudo muy cerca de los edificios al igual que los transformadores tipo pedestal. El autor reduce el campo magnético de 120 miligauss a 60 miligauss sobre un grupo de transformadores 10 kVA mediante la colocación de una tira de cobre.

En 1994, Yongbin, et al., [4.49], aplica el método T-Ω T para calcular las pérdidas por corrientes parásitas en un transformador 360MVA/500 kV. Los autores presentaron los resultados utilizando una pared del tanque con un shunt magnético, con una pantalla de aluminio y sin blindaje (véase la fig. 4.5).

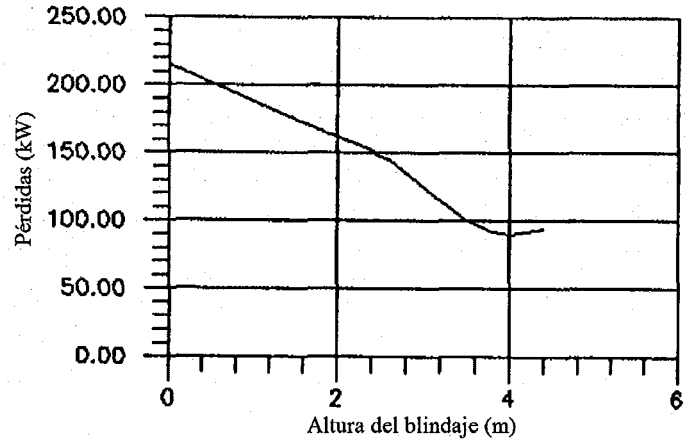


Fig. 4.5. La altura de shunts magnético contra las pérdidas parásitas totales en las partes metálicas. Derechos de autor IEEE, (Yongbin et al., 1994 [4.49]).

En 1999, Koppikar et al., [4.50], evaluaron las pérdidas de la placa "flitch" en un auto-transformador 33 MVA, monofásico, 220/132/11 kV. Los autores estudiaron los efectos de diferentes factores sobre las pérdidas en una placa flitch de acero suave utilizando una serie de simulaciones FEM en 2-D, y una técnica estadística. Los autores determinaron las pérdidas en placas flitch de acero dulce y acero inoxidable. Los autores modelan la placa flitch laminado (grado M4) usando curvas de materiales anisótropas disponibles en el software MAGNET 2.3.

En 2000, Takahashi et al., [4.51], analizaron el modelo de tanque de un transformador. El "modelo de tanque blindado" es un modelo de referencia para reducir el volumen de la placa de blindaje y para limitar la densidad de corrientes inducidas en el tanque dentro de un valor especificado. El modelo blindado del tanque se optimiza utilizando el método Rosenbrock y el método de elementos finitos. La placa de blindaje está hecha de acero al silicio de grano orientado , donde no hay flujo de corrientes inducidas. El método de diseño experimental (método de Taguchi) se utiliza para determinar el valor superior de la densidad de corriente inducida, que es adecuada para el método de optimización del modelo del tanque blindado y para determinar los valores iniciales adecuados.

En 2000, Kulkarni et al. [4.52], presentaron un artículo del estado del arte sobre la estimación y control de pérdidas parásitas en los transformadores. Los autores presentaron las principales componentes de pérdida parásitas: (a) pérdidas por corrientes inducidas en los devanados, (b) pérdidas por corriente circulantes en los devanados, (c) pérdidas en la placa flitch, (d) las pérdidas parásitas debidas a las corrientes altas, (e) las pérdidas en la estructura de sujeción , y (f) pérdidas en tanques. Los autores incluyen una sección relacionada con el blindaje magnético y por corriente de inducidas.

En 2007, Chen [4.53], analizó y comparó el efecto de blindaje de cuatro materiales: aire, aluminio, acero y un material hipotético con cero de conductividad y una permeabilidad relativa alta de 10000. El método de elementos finitos tridimensional se adopta para calcular el campo de disperso fuera del tanque del transformador. El acero logra el mejor rendimiento entre los tres materiales, lo que significa que el efecto de blindaje del material tanto con alta conductividad y alta permeabilidad es mejor que el material con alta conductividad, y el material con alta permeabilidad. Esta es una conclusión importante para blindaje magnético a frecuencia de la red. El transformador encerrado por tanques de tal material puede mantener el campo magnético disperso a una magnitud muy pequeña (véanse las Figs. 4.6 y 4.7).

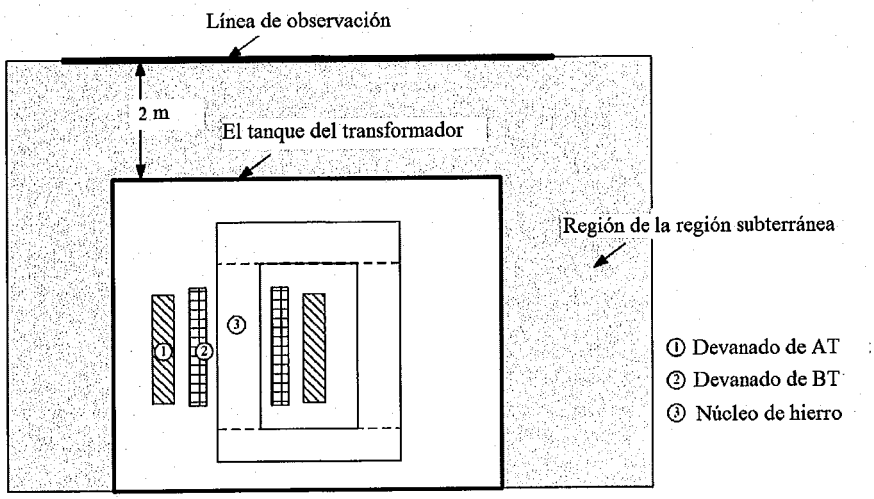


Fig. 4.6. Diagrama esquemático del transformador de 2000 kVA bajo prueba. Derechos de autor IEEE, (Chen et al., 2007 [4.53]).

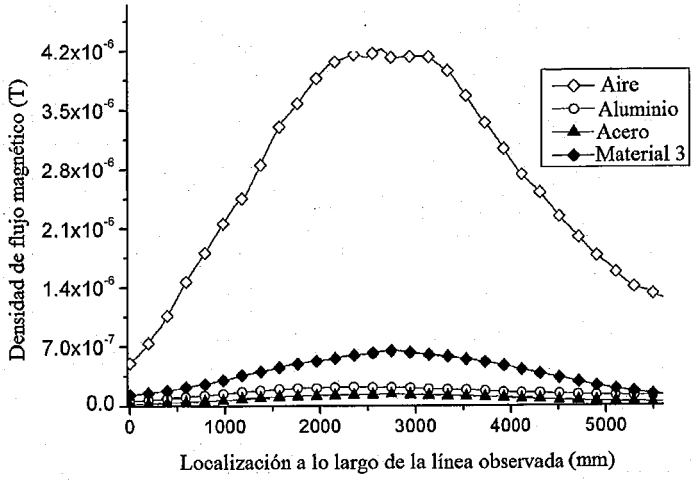


Fig. 4.7. Densidad de flujo magnético disperso a lo largo de la línea observada. Derechos de autor IEEE, (Chen et al., 2007 [4.53]).

ASPECTOS RELEVANTES DE LOS DIFERENTES ARTÍCULOS

La Fig. 4.8 muestra los métodos utilizados para estudiar las pérdidas del transformador. Vemos que más de la mitad de los métodos para estudiar las pérdidas del transformador provienen de la investigación analítica. Los métodos experimentales forman la cantidad más pequeña del total, y 7% de los artículos utilizan ambos métodos.

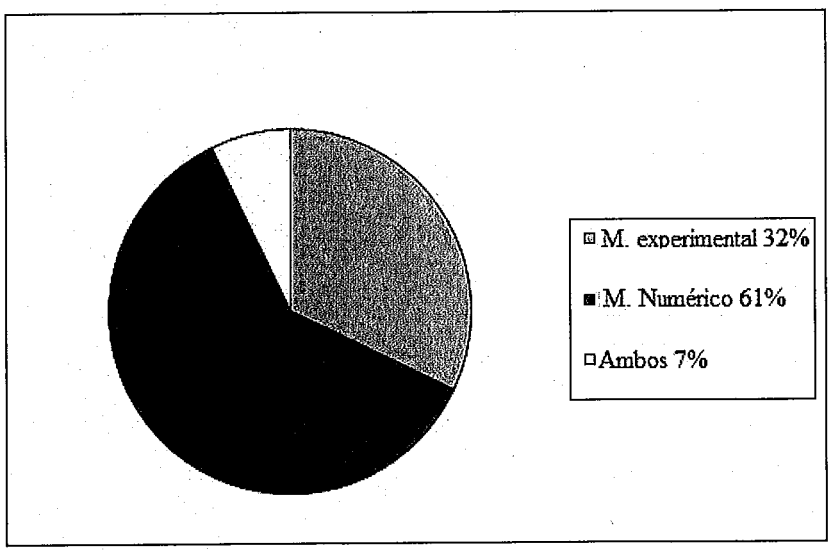


Fig. 4.8. El gráfico de pastel muestra los métodos utilizados para estudiar las pérdidas del transformador.

La Fig. 4.9 muestra el tipo de transformador usado para estudiar las pérdidas del transformador. Vemos que 17% del total corresponde a transformadores de distribución y 52% para los transformadores de gran potencia.

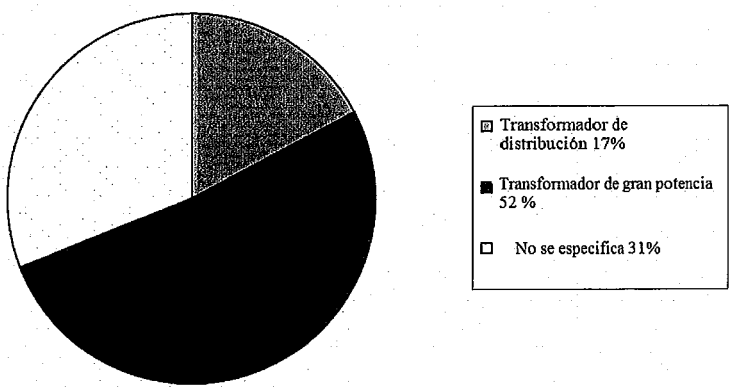


Fig. 4.9. El gráfico de pastel muestra el tipo de transformador utilizado para estudiar las pérdidas del transformador.

La Tabla 4.2 muestra cómo los diferentes tipos de transformadores contribuyen a las pérdidas anuales de energía del transformador en un sistema 5000-MW[4.54]. Las cifras anteriores de pérdidas son altas en transformadores de distribución, y son una consecuencia del número de transformadores instalados (se estima que hay 50 millones de transformadores de distribución en uso dentro de los Estados Unidos [4.54]). Por esta razón, se necesita más investigación en transformadores de distribución para reducir las pérdidas, debido al mayor potencial de ahorro en pérdidas de ellos.

Tabla 4.2. Pérdidas de transformador en un sistema de eléctrico típico

Tipo de transformador	Millones de kWh	
	Pérd. sin carga	Pérd. con carga
Generador	18	89
subestación de gran potencia	67	138
Subestación de distribución	97	114
Distribución	328	127
Total	510	468

Fuente: Electric Power Research Institute (EPRI)

El mismo porcentaje de los estudios se han realizado en 2D y 3D para estudiar las pérdidas del transformador como se muestra en la Fig. 4.10. Vemos que 16% del total corresponde a estudios en los que se utilizan 2D y 3D. Vemos en la Fig. 4. 11 que más artículos para estudiar las pérdidas del transformador provienen de Asia. El porcentaje menor corresponde a Europa con un 28%, mientras que América se encuentra entre Asia y Europa. Estos resultados son congruentes con la Tabla 4.3. En la fig. 4.12 se muestra que la industria tiene menos interés en la publicación de artículos en esta área del conocimiento. Los autores recomiendan la lectura de [4.55] para animar a las empresas en el proceso de redacción de los artículos en este tema.

Tabla 4.3. Distribución del gasto en I + D como % del PIB por continente

Continente	Gasto en R&D como % del PIB
Africa	0.25
America	2.89
Europa	2.21
Asia	12.05

Fuente : UNESCO Statistical Book, 1994.

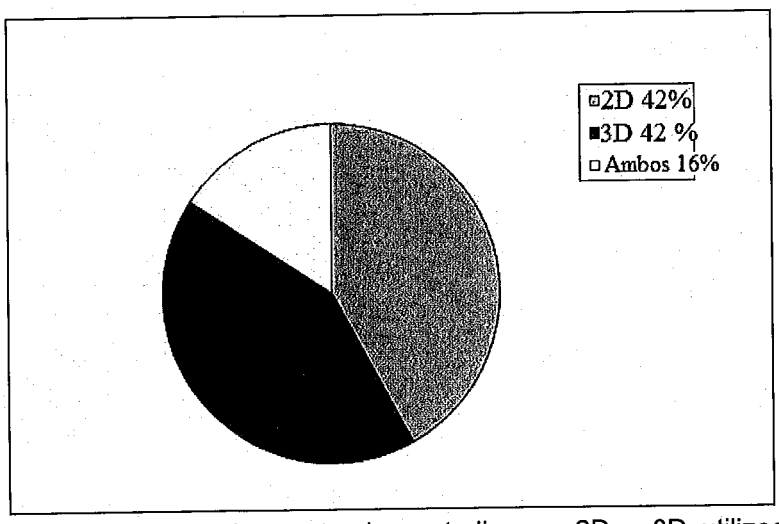


Fig. 4.10. El gráfico de pastel muestra los estudios en 2D y 3D utilizados para estudiar las pérdidas del transformador.

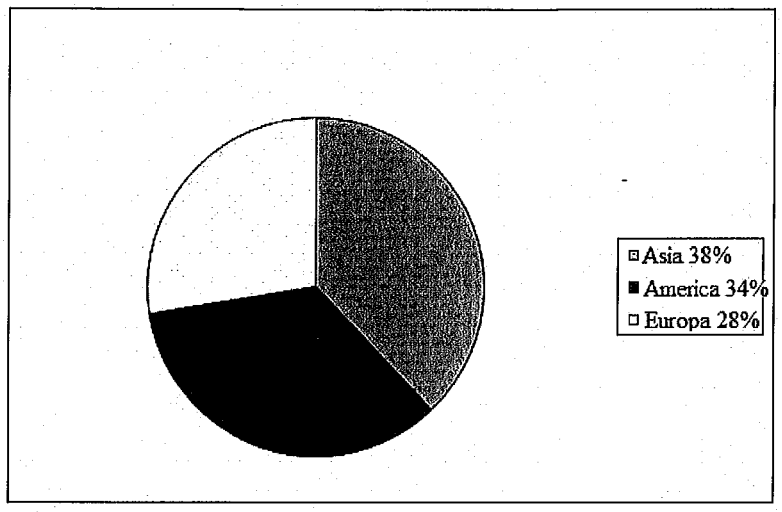


Fig. 4.11. El gráfico de pastel muestra los continentes que presentan investigación para estudiar las pérdidas del transformador.

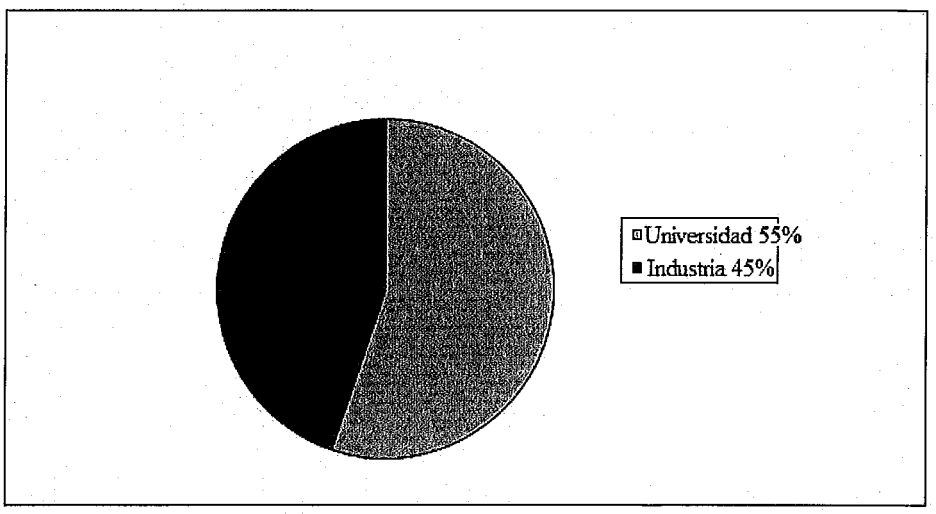


Fig. 4.12. El gráfico de pastel muestra la presencia de universidades e industrias en las publicaciones de artículos para estudiar las pérdidas del transformador.

CONCLUSIONES

Una extensa revisión del estado del arte de las pérdidas del transformador se ha presentado desde los años 50´s . En el entorno competitivo actual, la reducción de las pérdidas del transformador dará una ventaja competitiva.

El papel ha clasificado el problema de la pérdida del transformador en tres grupos: (a) las pérdidas en tanques debido a la alta corriente de las boquillas, (b) las pérdidas en las uniones de los núcleos de transformadores, y (c) las pérdidas parásitas en el tanque del transformador. Los estudios de los trabajos revelan algunos aspectos interesantes sobre la investigación de las pérdidas del transformador llevadas a cabo desde 50, tales como: métodos preferidos por investigaciones, el tipo de transformadores utilizados para la investigación, la frecuencia de los enfoques 2D o 3D utilizadas para la investigación, los continentes que hacer más investigación y la presencia de las universidades y la industria en la investigación en este tema.

Los estudios de los artículos de investigación actuales revelan que las pérdidas del transformador continúan siendo un área de investigación activa. Aunque algunos estudios sobre la reducción de pérdidas del transformador se han realizado en diferentes tipos de transformadores por algunos investigadores, hay más maneras de reducir las pérdidas del transformador y trabajo considerable necesita ser desarrollado para los modelos experimentales y teóricos, los siguientes aspectos deben mejorarse:

- mejora de las técnicas de medición de las pérdidas con carga y sin carga del transformador
- el uso de nuevos materiales para los transformadores para reducir las pérdidas del transformador
- el desarrollo de nuevos modelos de las pérdidas parásitas

CANAME

SE SECRETARÍA DE ECONOMÍA

REFERENCIAS

- Olivares-Galván, J. C. *Study of Loss Reduction in Distribution Transformers*, Doctor of Sciences Thesis, CINVESTAV-Guadalajara, Jalisco, México, 2003.

- Olivares, J. C., Kulkarni, S. V., Cañedo, J., Escarela-Perez, R., Driesen, J., and Moreno, P. "Impact of the joints design parameters of the wound core in distribution transformer losses," ACTA Press, vol. 23, pp. 151-157, 2003.

- Olivares, J. C., Cañedo, J., Moreno, P., Driesen, J., Escarela, R., and Palanivasagam, S. "Experimental study to reduce the distribution-transformers stray losses using electromagnetic shields," Electric Power Systems Research, vol. 63, pp. 1-7, 2002.

- Olivares, J. C., Liu, Y., Cañedo, J. M., Escarela-Pérez, R., Driesen, J., and Moreno, P. "Reducing losses in distribution transformers," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, pp. 821-826, July 2003.

- Olivares, J. C., Escarela-Perez, R., Kulkarni, S. V., de León, F., Melgoza-Vasquez, E., and Hernández-Anaya, O. "Improved insert geometry for reducing tank-wall losses in pad-mounted transformers," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, pp. 1120-1126, July 2004.

- Kulkarni, S. V., Olivares, J. C., Escarela-Perez, R., Lakhiani, V. K., and Turowski, J. "Evaluation of eddy current losses in the cover plates of distribution transformers," IEE Proc. Sci. Meas. Technol., vol. 151, pp. 313-318, September 2004.

- Olivares, J. C., Escarela-Perez, R., Kulkarni, S. V., de Leónd, F., and Venegas-Vega, M. A. "2D finite-element determination of tank wall losses in pad-mounted transformers," Electric Power Systems Research, vol. 71, pp. 179–185, 2004.

- Georgilakis, P. S., Hatziargyriou, N. D., and Paparigas, D. "AI helps reduce transformer iron losses," IEEE Computer Applications in Power, vol. 12, pp. 41-46, 1999.

- Georgilakis, P. S., Doulamis, N. D., Doulamis, A. D., Hatziargyriou, N. D., and Kollias, S. D. "A novel iron loss reduction technique for distribution transformers based on a combined genetic algorithm-neural network approach," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, vol. 31, pp. 16-34, 2001.

- Kefalas, T. D., Georgilakis, P. S., Kladas, A. G., Souflaris, A. T., and Paparigas, D. G. "Multiple grade lamination wound core: a novel technique for transformer iron loss minimization using simulated annealing with restarts and an anisotropy model," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, pp. 1082-1085, 2008.

- Georgilakis P. S., *Spotlight on modern transformer design*, Springer, London, UK, 2009.

- Poritsky, H., and Jerrard, R. P. "Eddy-current losses in a semi-infinite solid due to a nearby alternating current," AIEE Transactions, vol. 73, pp. 97-106, May 1954.

- Deuring, W. G. "Induced losses in steel plates in the presence of an alternating current," AIEE Transactions, vol. 75, pp. 166-173, June 1957.

- Saito, S., Inagaki, K., Sato, T., Inui, Y., Okuyama, K., and Otani, H. "Eddy currents in structure surrounding large currents bushing of a large capacity transformer," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 100, pp. 4502-4509, November 1981.

- Furman, Y. I., Bereza, V. L., Ivankov, V. F., and Nizhnik, L. P. "Losses in tanks of large power transformer, caused by magnetic fields, and methods of their reduction," CIGRE, paper 12-07, September 1988.

- Renyuan, T., Junyou, Y., Zhouxiong, W., Feng, L., Chunrong, L., and Zihong, X. "Computation of eddy current losses by heavy current leads and windings in large transformers using IEM coupled with improved R-Ψ Method," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 26, pp. 493-496, March 1990.

- Renyuan, T., Junyou, Y., Feng, L., and Yongping, L. "Solutions of three-dimensional multiply connected and open boundary problems by BEM in three-phase combinations transformers," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 28, pp. 1340-1343, March 1992.

- Junyou, Y., Renyuan, T., and Yan, L. "Eddy current fields and overheating problems due to heavy currents carrying conductor," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 30, pp. 3064-3067, September 1994.

- Turowski, J., and Pelikant, A. "Eddy currents losses and hot-spot evaluation in cover plates of power transformers," IEE Proc. Electr. Power Appl., vol. 144, pp. 435-440, November 1997.

- Kim, D. H., Hahn, S. Y., and Kim, S. Y. "Improved design of cover plates of power transformers for lower eddy current losses," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 35, pp. 3529-3531, September 1999.

- Jones, M. A., Moses, A. J., and Thompson, J. E. "Flux distribution and power loss in the mitered overlap joint in power transformer cores," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 9, pp. 114-122, June 1973.

- Nakata, T., Takahashi, N., and Kawase, N. "Magnetic performance of step-lap in distribution transformer cores," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 18, pp. 1055-1057, November 1982.

- Valkovic, Z., and Rezic, A. "Improvement of transformer core magnetic properties using the step-lap design," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 112, pp. 413-415, 1992.

- Löffler, F., Pfützner, H., and Booth, T. "Influence of air gaps in stacked transformer cores consisting of several packages," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 30, pp. 913-915, March 1994.

- Pfützner, H., Bengtsson, C., Booth, T., Löffler, F., and Gramm, K. "Three-dimensional flux distributions in transformer cores as a function of packages design," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 30, pp. 2713-2727, September 1994.

- Pietruszka, M., and Napieralska, E. "Laminations of T-Joints in the transformer core," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 32, pp. 1180-1183, May 1996.

- Elleuch, M., and Poloujadoff, M. "New transformer model including joint air gaps and lamination anisotropy," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 34, pp. 3701-3711, September 1998.

- Girgis, R. S., teNijenhuis, E. G., Gramm, K., and Wrethag, J. E. "Experimental investigation on effect of core production attributes on transformer core loss performance," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, pp. 526-531, April 1998.

- teNyenhuis, E. G., Mechler, G. F., and Girgis, R. S. "Flux distribution and core loss calculation for single phase and five limb three phase transformer core designs," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, pp. 204-209, January 2000.

- Mechler, G. F., and Girgis, R. S. "Magnetic flux distributions in transformer core joints," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, pp. 198-203, January 2000.

- Vogel, F. J., and Adolphson, E. J. "A stray loss problem in transformer tanks," AIEE Transactions, vol. 73, pp. 760-764, August 1954.

- Agarwal, P. D. "Eddy-current losses in solid and laminated iron," AIEE Transactions, pp. 169-181, May 1959.
- Mullineux, N., and Reed, J. R. "Eddy-current shielding of transformer tanks," IEE Proc., vol. 113, pp. 815-818, May 1966.

- Berezovskii, A. A., Kravchenko, A. N., and Nizhnik, L. P. "Calculation of stray losses in transformer tanks," Elektrichestvo, vol. 9, pp. 421-448, 1966.

- Kozlowski, M., and Turowski, J. "Stray losses and local overheating hazard in transformers," CIGRE 12-10, 1972.

- Allan, D. J., Mech, F. I., Mullineux, N., and Reed, J. R. "Some effects of eddy current in aluminium transformer tanks," IEE Proc., vol. 120, pp. 681-685, June 1973.

- Inui, Y., Saito, S., Okuyama, K., and Hiraishi, K. "Effects of tank and tank shields on magnetic fields and stray losses in transformer windings," Proc. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver, paper no. C73 401-7, pp. 1-7, 1973.

- Napoli, A. D., and Paggi, R. "Sizing magnetic shields in saturated conditions, for large transformer calculations by means of the finite element method," Proc. IEEE PES Summer Meeting, Mexico City, Mexico, paper no. A77 663-8, pp. 1-8, 1976.

- Valkovic, Z. "Calculation of the losses in three-phase transformer tanks," IEE Proc. C, vol. 127, pp. 20-25, January 1980Kazmierski, K., Kozlowski, M., Lasocinski, J., Pinkiewicz, I., and Turowski, J. "Hot spot identification and overheating hazard preventing when designing a large transformer," CIGRE 12-12, 1984.

- Szabados, B., El Nahas, I., El Sobki, M. S., Findlay, R. D., and Poloujadoff, M. "A new approach to determine eddy current losses in the tank walls of a power transformer," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 2, pp. 810-816, July 1987.

- Harrison, T. H., and Richardson, B. "Transformer loss reduction," CIGRE 12-04, 1988.

- Komulainen, R., and Nordman, H. "Loss evaluation and the use of magnetic and electromagnetic shields in transformer," CIGRE 12-03, 1988.

- Namjoshi, K. V., and Biringer, P. P. "Efficiency of eddy current shielding of structural steel surrounding large currents: a circuit approach," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 27, pp. 5417-5419, November 1991.

- Holland, S. A., O´Connell, G. P., and Haydock, L. "Calculating stray losses in power transformers using surface impedance with finite elements," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 28, pp. 1355-1358, March 1992.

- Pavlik, D., Johson, D. C., and Girgis, R. S. "Calculation and reduction of stray and eddy losses in core-form transformers using a highly accurate finite element modelling technique," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, pp. 239-245, January 1993.

- Guérin, C., Tanneau, G., and Meunier, G. "3D eddy current losses calculation in transformer tanks using the finite element method," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 29, pp. 1419-1422, March 1993.

- O'Connor, H. "Shielding and magnetic field reduction for small and medium size transformers and reactors," Proc. Electrical Electronics Insulation and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, pp. 719 –724, 1993.

- Yongbin, C., Junyou, Y., Hainian, Y., and Renyuan, T. "Study on eddy current losses and shielding measures in large power transformers," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 30, pp. 3068-3071, September 1994.

- Koppikar, D. A., Kulkarni, S. V., Srinivas, P. N., Khaparde, S. A., and Jain, R. "Evaluation of flitch plate losses in power transformer," IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 14, pp. 996-1001, July 1999.

- Takahashi, N., Kitamura, T., Horii, M., and Takehara, J. "Optimal design of tank shield model of transformer," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 36, pp. 1089-1093, July 2000.

- Kulkarni, S. V., and Khaparde, S. A. "Stray loss evaluation in power transformer-a review," Proc. IEEE PES Winter Meeting, pp. 2269-2274, January 2000.

- Chen, D., Yu, H., and Yuan, J. "Analysis on the shielding effect of the power transformer tank," PIERS ONLINE, vol. 3, pp. 916-919, 2007.

- B. W. Kennedy, *Energy Efficient Transformers*, McGraw-Hill, 1998.

- Franke, E., and Thornton, R. "Motivating the writing process: who says engineering have no emotions," Communicators are people too, IEEE, pp. 244-249, 1995.

CANAME

SE
SECRETARÍA
DE ECONOMÍA

Solicitud de Apoyo Programa para el Desarrollo de las Industrias de Alta Tecnología (PRODIAT)

III. Resultado del Estudio de Inteligencia y Vigilancia Tecnológica Competitiva del Sector Eléctrico

RESUMEN EJECUTIVO

RESUMEN EJECUTIVO DEL ESTUDIO DE INTELIGENCIA TECNOLÓGICA – TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN DE ALTA EFICIENCIA

El objetivo de este estudio era detectar tecnologías que permitan cumplir con los requerimientos de eficiencia y de seguridad de la norma mexicana NOM-002-SENE-2010. Se encontraron en total 886 documentos que describen tecnologías relacionadas con transformadores de distribución, para lo cual se utilizaron diferentes estrategias de búsqueda, incluyendo determinación de clasificaciones internacionales de patentes pertinentes y palabras clave. Para cada tipo de transformador y estrategia de eficiencia se tuvieron los siguientes resultados generales.

ESTRATEGIA TECNOLÓGICA	Total Documentos	TITULAR PRINCIPAL
Transformadores tipo pedestal	55	ABB y General Electric
Transformadores tipo poste	40	ABB
Transformadores de subestación	17	Shastik Valerij Filippovich y Selivanov Nikolaj Pavlovich
Transformadores sumergibles	17	China Eastar
Tecnologías de alta eficiencia	84	No se detecta un titular líder
Tecnologías que evitan pérdidas de calor, hierro (en el núcleo), cobre (en el núcleo) y vacío	89	Shangai Zhixing Electric, Toshiba y Jianxi No 2 Electric Power Equipment
tecnologías que evitan pérdidas magnéticas	39	TDK y Honeywell
Tecnologías para hermeticidad o sellado	77	ABB
Tecnologías para evitar cortocircuitos	40	Areva/Alstom

Del total de documentos, la Figura 1 muestra sus países de origen en función del tiempo.

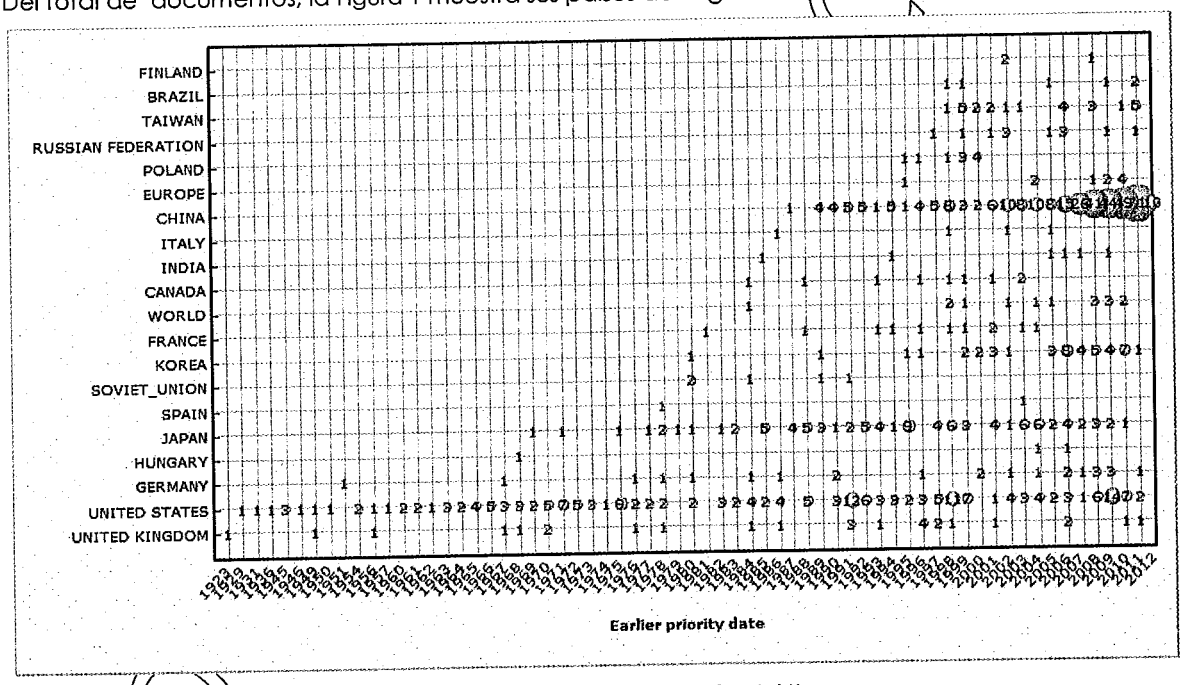


Figura 1 Países de origen en función del tiempo

Destacan Estados Unidos y Reino Unido como países con tradición en el desarrollo de tecnologías relacionadas con transformadores de distribución. Alemania, Japón y Corea iniciaron poco después el desarrollo de este tipo de tecnologías aunque el número de documentos que presentan no es muy grande. En el caso de China, líder en el total de documentos encontrados, inició el desarrollo de tecnologías relacionadas con transformadores de distribución a partir de 1989 y en los últimos 7 años ha tenido un crecimiento significativo en estos desarrollos, quizás por la consolidación de su sistema

de propiedad intelectual y una estrategia del gobierno Chino hacia el desarrollo tecnológico y la presentación de patentes. Otros países de BRIC llaman la atención también.

La figura 2 muestra los titulares principales en el área tecnológica de los transformadores de distribución, en función del número total de documentos que se encontraron. La empresa ABB es el líder en número de tecnologías presentadas de este tipo. En segundo lugar se encuentra Westinghouse Electric y posteriormente General Electric, MC Graw-edison of Canada Limited, Hitachi, Toshiba, State Grid Electric Power Research Institute y Siemens. Todos estos titulares se consideran competidores potenciales en el mercado de los transformadores de distribución.

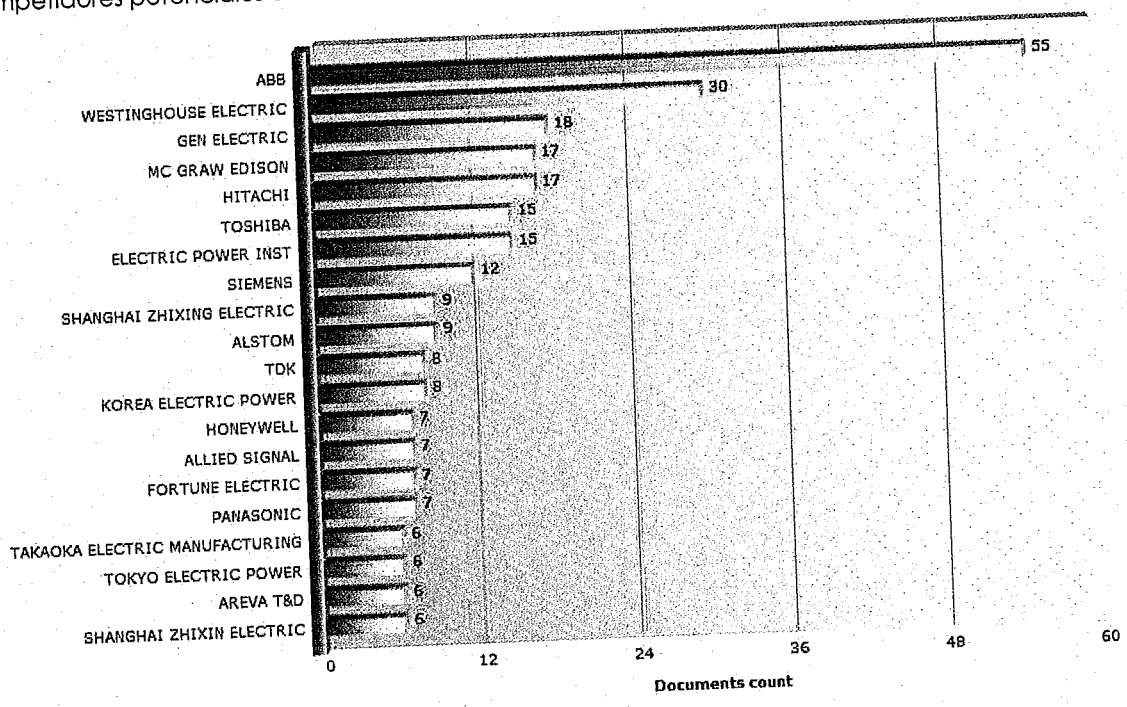


Figura 2 Principales titulares en desarrollos tecnológicos relacionados con transformadores de distribución

Adicionalmente, se detectó que los mercados de mayor interés son China, Estado Unidos, Japón, la comunidad Europea, Canadá, Corea, Alemania, Australia, Reino Unido, Taiwán, Austria, India y España.

De acuerdo al análisis de mercado realizado tanto desde el punto de vista de propiedad intelectual como el de mercado, se observa una tendencia de crecimiento para los próximos años en el mercado del sector eléctrico, y en particular en el desarrollo de transformadores de alta eficiencia. Los principales impulsores de este desarrollo es la necesidad de mejorar el control de pérdidas en la distribución de energía eléctrica y la necesidad de condiciones de durabilidad y seguridad en los mismos.

A partir del estudio se puede concluir que en el sector de desarrollo de transformadores existen muchas oportunidades de alianzas estratégicas y de desarrollo de tecnología para empresas Mexicanas, tanto por el mercado interno como por las capacidades tecnológicas y de manufactura existentes localmente, lo que lo coloca a México con un potencial de proveeduría de transformadores que puedan ser competitivos a nivel internacional.

REPORTE FINAL

ESTUDIO DE INTELIGENCIA TECNOLÓGICA – TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN DE ALTA EFICIENCIA

INDICE

1. Objetivos. 3
2. Bases de Análisis. 3
   2.1. Información proporcionada por CANAME. 3
   2.1.1. Norma Mexicana NOM-002-SEDE-2010. 3
   2.1.2. Norma Mexicana NMX-J-169-ANCE-2004 3
   2.1.3. Norma Mexicana NOM-001-SEDE-2012. 3
   2.2. Información obtenida por BCB. 3
   2.2.1. Bases de datos de patentes. 4
   2.2.2. Limitaciones. 5
   2.2.3. Parámetros de búsqueda. 5
3. Análisis. 5
   3.1. Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEDE-2010. 7
   3.2. Análisis de las clases internacionales. 8
   3.3. Panorama general de tecnologías relacionadas con transformadores de distribución. 8
   3.3.1. Estado de madurez de tecnologías relacionadas con transformadores de distribución. 9
   3.3.2. Análisis por país de origen y de publicación. 12
   3.3.3. Análisis de Competidores. 13
   3.3.4. Análisis general y documentos relevantes encontrados en México. 16
   3.4. Documentos relevantes de acuerdo a las características de la Norma Mexicana 17
   3.4.1. Documentos relevantes relacionados con transformadores de distribución tipo pedestal. 18
   3.4.2. Documentos relevantes relacionados con transformadores de distribución tipo poste. 19
   3.4.3. Documentos relevantes relacionados con transformadores de distribución en subestación. 20
   3.4.4. Documentos relevantes relacionados con transformadores de distribución sumergibles. 26
   3.5. Cliente y/o mercados potenciales para la tecnología. 26
   3.5.1. Mercado global de equipos eléctricos. 28
   3.5.2. Mercado de equipos eléctricos en México. 32
   3.5.3. Competidores y/o aliados potenciales en México. 32
   3.5.4. Clientes potenciales para la tecnología. 33
   3.6. Recomendaciones generales para la estrategia de protección de Propiedad Intelectual para nuevos desarrollos. 34
4. Conclusiones y/o recomendaciones. 35
5. Anexos. 35

Anexo C. Documentos relacionados con transformadores de distribución que no fueron clasificados en ninguna categoría de acuerdo al análisis realizado. 35

Anexo D. Documentos relacionados con transformadores de distribución de tipo pedestal. 35

CONFIDENCIAL

Anexo E. Documentos relacionados con transformadores de distribución de tipo poste. 35

Anexo F. Documentos relacionados con transformadores de distribución en subestación. 35

Anexo G. Documentos relacionados con transformadores de distribución sumergibles. 36

Anexo H. Documentos relacionados con transformadores de distribución de alta o mejorada eficiencia. . 36

Anexo I. Documentos relacionados con transformadores de distribución que evitan o disminuyen la pérdida de calor, de vacío, de hierro y de cobre (del núcleo) 36

Anexo J. Documentos relacionados con transformadores de distribución que evitan o disminuyen la pérdida magnética. 36

Anexo K. Documentos relacionados con transformadores de distribución herméticos o sellados. 36

Anexo L. Documentos relacionados con transformadores de distribución que evita o disminuyen los cortocircuitos. 36

Anexo M. Documentos relacionados redes eléctricas de transformadores de distribución. 36

CONFIDENCIAL

1. Objetivos.

Los principales objetivos del estudio son:

- Identificar las tecnologías relevantes disponibles en México para el cumplimiento de la Norma Mexicana NOM-002-SEDER-2010, "Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución", con base en un análisis del estado de la técnica en las áreas tecnológicas relacionadas.
- Determinar la posición de la Propiedad Intelectual de empresas con actividades en las áreas tecnológicas relacionadas, mediante el análisis de riesgo potencial respecto de derechos de propiedad intelectual de terceros en éstas áreas.

Como parte de las actividades para lograr los objetivos anteriormente descritos se buscará y analizará información que nos permita: analizar las normas técnicas que afectan a los transformadores de distribución, identificar tecnologías y competidores potenciales, identificar potenciales aliados tecnológicos en México y en el extranjero, identificar clientes y o mercado potenciales identificar qué tecnologías son de libre uso en México. Adicionalmente, el análisis de toda esta información nos permitirá proporcionarles recomendaciones generales para la estrategia de protección de Propiedad Intelectual para nuevos desarrollos.

Es importante mencionar que el presente reporte es un análisis general que permitirá generar un panorama general y global de tecnologías relacionadas con transformadores de distribución principalmente aquéllos de alta eficiencia. Sin embargo, si se detecta alguna tecnología de interés descrita en los documentos identificados a partir del análisis realizado, se recomienda hacer un análisis detallado de la tecnología principalmente para determinar si es de libre uso en México y si es factible implementarlo tecnológicamente cumpliendo las normas mexicanas vigentes que apliquen.

2. Bases de Análisis.

2.1. *Información proporcionada por CANAME.*

2.1.1. Norma Mexicana NOM-002-SEDE-2010.
Recibido por correo electrónico el día 21 de Julio de 2012.

2.1.2. Norma Mexicana NMX-J-169-ANCE-2004

Recibido por correo electrónico el día 25 de Octubre de 2012.

2.1.3. Norma Mexicana NOM-001-SEDE-2012

Recibido por correo electrónico el día 11 de Octubre de 2012.

2.2. *Información obtenida por BCB.*

2.2.1. Bases de datos de patentes.
Becerril, Coca y Becerril, S.C., cuenta con bases de datos propias para realizar búsquedas, las cuales contienen información desde Noviembre de 1971 hasta Septiembre de 2012 para patentes concedidas, desde Diciembre de 1991 hasta Octubre de 2012 para solicitudes de patente publicadas y desde Marzo de 1992 hasta Septiembre de 2012 para registros de modelo de utilidad, todas estas bases incluyendo hasta la última gaceta oficial del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI) que se encuentre disponible.

Adicionalmente las búsquedas en México son verificadas en el sistema conocido como SIGA (Sistema de Información de la Gaceta de la Propiedad Industrial) administrado por el IMPI, que

CONFIDENCIAL

almacena los datos bibliográficos de las patentes y registros de modelo de utilidad desde 1890, y a partir de Diciembre de 1991 para solicitudes de patente publicadas y registros de modelo de utilidad, cubriendo en todos los casos hasta la última gaceta oficial del IMPI.

Para las búsquedas de documentos en el extranjero, nuestra firma cuenta con la capacidad de realizar búsquedas por medio de los motores de búsqueda en bases de datos de documentos internacionales Delphion y Questel Orbit que incluye bases de datos ampliamente reconocidas como INPADOC y DERWENT, así como corroborarlas con otras bases de datos como la de la Oficina de Patentes y Marcas de los EUA, la Oficina Europea de Patentes y la Gaceta Electrónica del Tratado de Cooperación en Materia de Patentes, entre otras.

A manera de resumen, la capacidad de las bases de datos extranjeras nos permite localizar documentos de 65 países de 1968 a la fecha, patentes de los EUA de 1971 a la fecha, solicitudes de patente europeas de 1979 a la fecha, patentes europeas de 1980 a la fecha, patentes y solicitudes de patente japonesas de 1976 a la fecha, y solicitudes internacionales del Tratado de

Cooperación en Materia de Patentes (PCT) de 1978 a la fecha. Adicionalmente, es posible localizar documentos de los EUA específicos desde 1790 a la fecha. Las bases de datos internacionales se actualizan semanalmente para incorporar la información de las publicaciones de cada país, y la cobertura de documentos depende de la disponibilidad de información de cada país.

2.2.2. Limitaciones.

De acuerdo a la Ley de la Propiedad Industrial, así como en las legislaciones de la mayoría de los países contratantes de la Organización Mundial de Comercio (OMC), las solicitudes de patente en trámite se publican lo más pronto posible después del vencimiento de un plazo de 18 meses contado a partir de la fecha de presentación. En tanto se cumplen los 18 meses, los expedientes oficiales permanecen en estado de absoluta confidencialidad, no habiendo posibilidad de consulta alguna sobre los mismos.

Una vez que las solicitudes de patente son publicadas, se puede tener acceso a la descripción y reivindicaciones de la solicitud de patente tal como fue presentada. Es muy importante mencionar que durante el trámite de las solicitudes de patente, éstas pueden sufrir modificaciones considerables en las reivindicaciones cambiando el alcance de las mismas al ser otorgadas. Además, siempre hay la posibilidad de que existan solicitudes de patente divisionales o de continuación (EUA), las cuales no se publican sino hasta que son otorgadas o presentadas por lo que es imposible detectarlas.

Por lo que respecta a los registros de modelo de utilidad y de diseño industrial, estos no se publican en algunos países sino hasta que son concedidos. Por lo tanto, los expedientes correspondientes permanecen en estricta confidencialidad, tampoco habiendo posibilidad alguna de consulta sobre los mismos.

No obstante que la cobertura de las bases de datos internacionales es amplia, éstas amplían todavía más tal cobertura periódicamente, ya sea mediante la incorporación de documentos anteriores, o de otros países no considerados previamente. Asimismo, la confiabilidad de las bases de datos internacionales, al provenir normalmente de diversas autoridades o proveedores, pueden contener errores que lleven a la omisión de documentos.

Por lo tanto tampoco es posible detectar todos los documentos que han sido registrados en todos los países, aún cuando tales países estén considerados en algún período dentro de las bases de datos internacionales.

Es importante aclarar que, cuando se encuentran varias patentes equivalentes en diferentes países (familia de patentes), el presente reporte únicamente incluye uno de los documentos equivalentes. Por lo tanto, en caso de que usted tenga interés especial en conocer en qué

CONFIDENCIAL

países ha sido presentado alguno de los documentos reportados, le suplicamos ponerse en contacto con nosotros, pues el no hacerlo puede dar lugar a una infracción de una patente en algún país de no confirmarse la existencia de una patente relevante.

Nuestras búsquedas no incluyen la obtención de las copias de los documentos encontrados. Sin embargo, en caso de requerirlas, nuestra firma cuenta con la capacidad de obtener dichos documentos, ya sea en México o en el extranjero, con un costo adicional, tales documentos siendo proporcionados en el idioma de origen. En caso de requerirse traducción al español, ésta también tendrá un costo adicional. No obstante, en caso de que usted requiera versiones electrónicas de hasta 10 documentos EP, US o PCT, nuestra firma los enviará sin cargo como una cortesía.

Finalmente, de acuerdo a lo anteriormente expuesto, el resultado de una búsqueda de este tipo no es del todo preciso, ya que como se puede observar, existen plazos durante los cuales no es posible detectar solicitudes de patente o de registro, así como omisiones en las bases de datos de documentos que pudieran estar relacionadas con el asunto de referencia.

2.2.3. Parámetros de búsqueda.

La identificación de los documentos relevantes para la realización del presente reporte se hizo por medio de una búsqueda general relacionada con transformadores de distribución de alta eficiencia. Los parámetros de búsqueda seleccionados se basaron en la información descrita en la Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEDE-2010, la cual menciona los requisitos mínimos de seguridad y eficiencia que deben cumplir los transformadores de distribución.

Las palabras claves utilizadas fueron: transformador de distribución, pedestal, poste, sumergible, subestación, pad-mounted, pole-mounted, sumergible, high efficiency, underground, heat loss, power loss, magnetic loss, iron loss, copper loss, vacuum loss, substation, short-circuit, insulated liquid, sealed, hermetically y distribution network. El número total de documentos encontrados fue de 886.

3. Análisis.

De acuerdo a la búsqueda que se llevó a cabo, se detectaron 886 familias de documentos relacionados con transformadores de distribución.

Considerando que una familia protege una tecnología única, se consideraron 886 tecnologías de importancia para el diseño y mejora de transformadores de distribución de alta eficiencia.

Antes de describir los resultados de la búsqueda, se mencionarán los aspectos más importantes a los que se refiere la Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEDE-2010.

3.1. Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEDE-2010.

✓ *Problemática*[1]

En la actualidad existe una tendencia a nivel mundial para promover mayores eficiencias en transformadores de distribución. EUA, Japón, India y China han implementado o modificado recientemente sus requerimientos de eficiencia mínima.

Las eficiencias establecidas en la norma mexicana habían estado vigentes desde 1999; por lo que en México, existía un rezago de aproximadamente 13 años en cuanto a eficiencia energética se refiere. El diseño y fabricación de transformadores con mejores eficiencias es una necesidad del sector eléctrico mexicano hoy en día.

[1] Anteproyecto de norma oficial mexicana nom-002-sede/ener-2012, requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución, No. De expediente 13/0767/161012,, MIR Ordinaria, SENER, 16/10/2012

CONFIDENCIAL

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) ha estado adquiriendo transformadores de distribución con eficiencias superiores a las establecidas en la norma vigente. La producción de transformadores eléctricos se ha mantenido constante en los últimos 5 años y son los fabricantes afiliados a la Cámara Nacional de Manufacturas Eléctricas (CANAME), quienes manufacturan el 85 % de la producción nacional de transformadores, teniendo una producción anual total de 60 000 transformadores.

La CFE adquiere transformadores de distribución mediante un sistema de evaluación el cual permite comprar bajo especificaciones mínimas establecidas en la Norma en vigor. Sin embargo, las adquisiciones de CFE representan sólo 40% de las compras nacionales, lo que implica que el 60% de los transformadores comercializados en México son comprados por particulares. Por ello, es importante que los equipos que se oferten en el mercado cumplan con una norma, con eficiencias y condiciones de seguridad por encima de las establecidas actualmente y cuenten con un Certificado de conformidad del producto.

Por lo anterior, se hace necesario actualizar la regulación vigente para garantizar que la fabricación del producto se hace conforme a los requisitos mínimos establecidos en la Norma Oficial Mexicana en cuanto a seguridad y eficiencia energética, protegiendo de esta manera en primer lugar al consumidor, clarificando las características y especificaciones que deben cumplir los transformadores y con ello, disminuir el riesgo de que se instalen transformadores ineficientes y/o inseguros.

✓ *Antecedentes*

De conformidad con el artículo 51 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, la Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEDE-1999, Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución, entró al proceso de revisión quinquenal a que refiere dicho dispositivo legal.

Con fecha del 24 de abril de 2007, el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Instalaciones Eléctricas aprobó la versión final del Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-002-SEDE-2007, Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución.

De conformidad con el artículo 47 fracciones I y II de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y 33 párrafo primero de su Reglamento, se publicó en el Diario Oficial de la Federación el 17 de junio de 2009 el Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-002-SEDE-2007, para consulta pública.

Durante el plazo de 60 días naturales contados a partir de la fecha de publicación de dicho proyecto de norma oficial mexicana, la Manifestación de Impacto Regulatorio a que se refiere el artículo 45 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y 32 de su Reglamento estuvo a disposición del público en general para su consulta, y que dentro del mismo plazo, los interesados presentaron sus comentarios al proyecto de norma, los cuales fueron analizados por el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Instalaciones Eléctricas, realizándose las modificaciones procedentes y aprobando el proyecto final el día 8 de julio de 2010.

En atención a la necesidad de contar con un instrumento normativo que regule los aspectos de seguridad y eficiencia energética de los transformadores de distribución, se tuvo a bien expedir la Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEDE-2010, Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución.

✓ *Conceptos principales de la norma.*

La Norma establece los requisitos mínimos de seguridad y eficiencia energética que deben cumplir los transformadores de distribución, además establece los métodos de prueba que deben utilizarse para evaluar estos requisitos.

CONFIDENCIAL

Se aplica a los transformadores de distribución de fabricación nacional e importados, autoenfriados en líquido aislante, destinados al consumidor final, cuando sean comercializados en México.

Asimismo, la Norma aplica cuando el transformador de distribución sea objeto de reparación, reconstrucción o reinstalación con el propósito de comercializarse en territorio nacional.

En general se describen 4 tipos de transformadores de distribución:

- Transformador de distribución tipo pedestal: conjunto formado por un transformador de distribución con un gabinete integrado en el cual se incluyen accesorios para conectarse en sistemas de distribución subterránea, este conjunto está destinado para instalarse en un pedestal y para servicio en intemperie.
- Transformador de distribución tipo poste: es aquel transformador de distribución que por su configuración externa está dispuesto en forma adecuada para sujetarse o instalarse en un poste o en alguna estructura similar.
- Transformador de distribución tipo subestación: es aquel transformador de distribución que por su configuración externa está dispuesto en forma adecuada para ser instalado en una plataforma, cimentación o estructura similar y su acceso está limitado por un área restrictiva.
- Transformador de distribución tipo sumergible: es aquel transformador de distribución que por su configuración externa está dispuesto en forma adecuada para ser instalado en un pozo o bóveda y que está expuesto a sufrir inundaciones.

De acuerdo a la norma, los transformadores de distribución deben cumplir con las especificaciones de seguridad referidas a cortocircuitos y a la preservación del líquido aislante; y las especificaciones de eficiencia en donde deben cumplir con valores de eficiencia mayores a aproximadamente a 97.75% y valores mínimos para las pérdidas de vacío, de corriente de excitación y pérdidas debidas a la carga.

Los conceptos de la norma descritos anteriormente fueron la base del presente reporte, como podrá observarse más adelante, ya que las características que se evaluaron en los documentos encontrados se seleccionaron de acuerdo al cumplimiento de los requisitos de la norma.

3.2. *Análisis de las clases internacionales.*

Como parte del análisis de los documentos encontrados se identificó cuáles eran las clases internacionales más comunes para este tipo de tecnologías. El resultado se encuentra descrito en la siguiente tabla donde se muestran las 10 principales clases internacionales identificadas en los documentos.

CLASE INTERNACIONAL	DESCRIPCIÓN DE LA CLASE
H01F27/00	**Transformadores variables o inductancias variables**
H01F27/02	Envolturas
H01F27/08	Refrigeración, Ventilación
H01F27/24	Núcleos magnéticos
H01F27/28	Bobinas; Arrollamientos; Conexiones conductoras
H01F27/30	Fijación o sujeción de bobinas, arrollamientos o partes de ellas entre sí; Fijación o montaje de bobinas o arrollamientos sobre el núcleo, en las envolturas o sobre otros soportes

CONFIDENCIAL

de propiedad intelectual y una estrategia del gobierno Chino hacia el desarrollo tecnológico y la presentación de patentes. Otros países de BRIC llaman la atención también.

La figura 2 muestra los titulares principales en el área tecnológica de los transformadores de distribución, en función del número total de documentos que se encontraron. La empresa ABB es el líder en número de tecnologías presentadas de este tipo. En segundo lugar se encuentra Westinghouse Electric y posteriormente General Electric, MC Graw-edison of Canada Limited, Hitachi, Toshiba, State Grid Electric Power Research Institute y Siemens. Todos estos titulares se consideran competidores potenciales en el mercado de los transformadores de distribución.

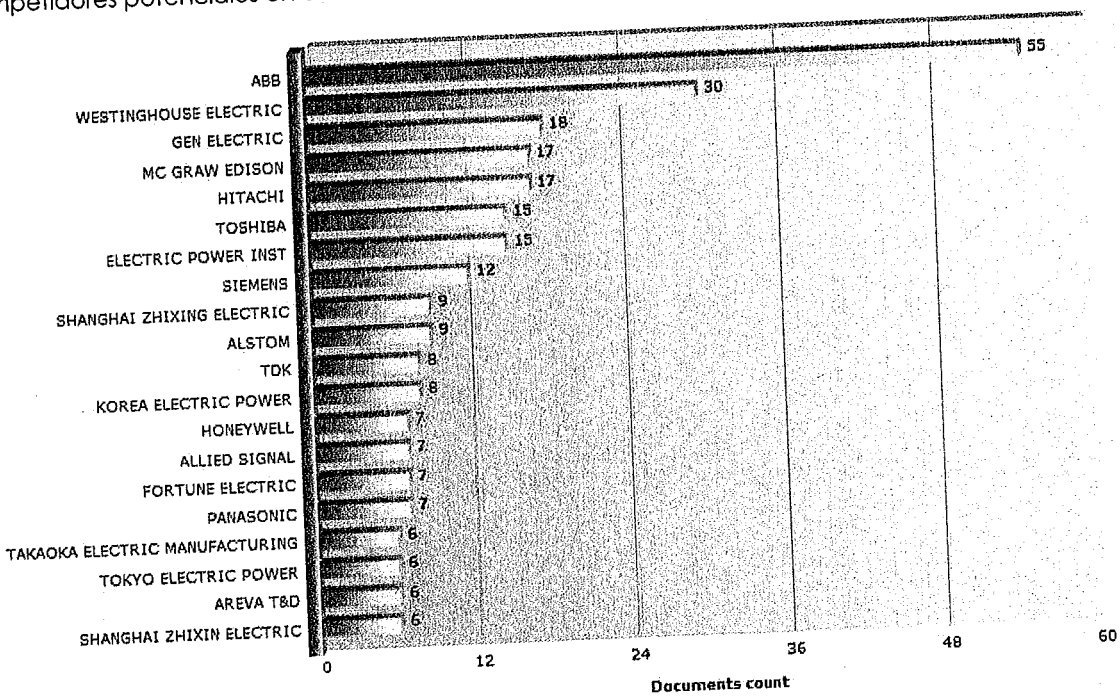


Figura 2 Principales titulares en desarrollos tecnológicos relacionados con transformadores de distribución

Adicionalmente, se detectó que los mercados de mayor interés son China, Estado Unidos, Japón, la comunidad Europea, Canadá, Corea, Alemania, Australia, Reino Unido, Taiwán, Austria, India y España.

De acuerdo al análisis de mercado realizado tanto desde el punto de vista de propiedad intelectual como el de mercado, se observa una tendencia de crecimiento para los próximos años en el mercado del sector eléctrico, y en particular en el desarrollo de transformadores de alta eficiencia. Los principales impulsores de este desarrollo es la necesidad de mejorar el control de pérdidas en la distribución de energía eléctrica y la necesidad de condiciones de durabilidad y seguridad en los mismos.

A partir del estudio se puede concluir que en el sector de desarrollo de transformadores existen muchas oportunidades de alianzas estratégicas y de desarrollo de tecnología para empresas Mexicanas, tanto por el mercado interno como por las capacidades tecnológicas y de manufactura existentes localmente, lo que lo coloca a México con un potencial de proveeduría de transformadores que puedan ser competitivos a nivel internacional.

H01F27/32	Aislamiento de bobinas, arrollamientos o de sus elementos
H01F27/40	Asociación estructural de componentes eléctricos incorporados, p. ej. fusibles
H01F30/00	**Transformadores fijos no cubiertos por el grupo H01F 19/00**
H01F30/06	Caracterizados por la estructura
H01F41/00	**Aparatos o procedimientos especialmente adaptados a la fabricación o al acoplamiento de dispositivos cubiertos por la presente subclase**
H01F41/02	Para la fabricación de núcleos, bobinas o imanes

Revisando las clases internacionales encontradas se observa que todas ellas están muy relacionadas con tecnologías que describen transformadores de distribución en general ya que la tecnología de interés puede estar englobada por una sola clase o por la combinación de más de una clase internacional.

3.3. Panorama general de tecnologías relacionadas con transformadores de distribución.

A partir de los documentos encontrados, se realizó un análisis general para identificar el panorama actual de las tecnologías relacionadas con transformadores de distribución identificando por año el número de solicitudes presentadas. Este análisis involucra todos los componentes y aspectos que se relación con estos transformadores sin clasificarse por tipos o por característica esencial.

3.3.1. Estado de madurez de tecnologías relacionadas con transformadores de distribución.

La Figura 1 muestra el análisis en donde se relaciona el número de documentos presentados con respecto a la fecha de prioridad de los documentos.

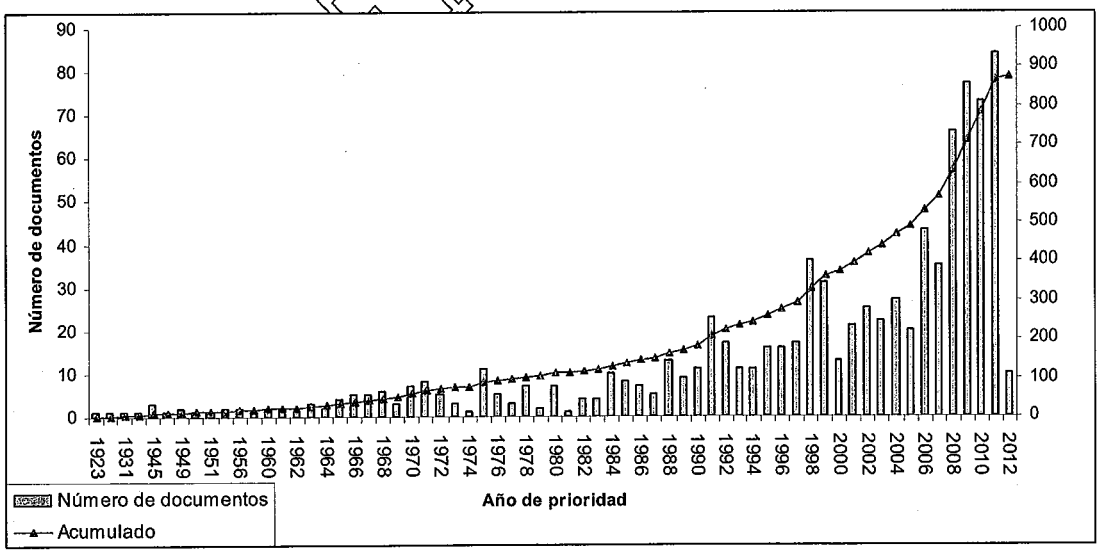


Figura 1 Panorama general de la tecnología de 1923 a 2012

Este tipo de tecnologías no tuvo incremento importante en el número de documentos presentados hasta 1984 en donde se observa más claramente un incremento más definido en la

línea acumulada. A partir de esta fecha, el número de tecnologías en este campo se han estado desarrollando de manera relativamente constante teniéndose picos importantes en 1991, 1998 y en 2006.

Es interesante observar que desde 2008, este tipo de tecnologías ha tenido un desarrollo mayor que en años anteriores. Esta tendencia puede tener dos explicaciones.

Un factor es probablemente a la necesidad constante de contar con tecnologías novedosas e innovadoras que proporcionen mayor eficiencia en los equipos y que sean consistentes con las modificaciones en las normas relacionadas con dispositivos eléctricos que se han estado llevando a cabo en diferentes países.

No obstante, el otro factor es la incorporación de China a la OMC y la firma de los Acuerdos sobre los Derechos de Propiedad Intelectual relacionados con el Comercio (ADPIC), a partir de lo cual China comenzó a presentar patentes de modo significativo, lo cual puede observarse en la siguiente sección en la que se analizan los documentos de patente por territorio.

Analizando la curva de crecimiento de este tipo de tecnologías, se puede considerar que la tecnología está en una segunda etapa de desarrollo puesto que aún no se observa un estancamiento en el ciclo de vida de la tecnología. Sin embargo, de acuerdo a la curva, el desarrollo en que se encuentra es avanzado; casi incluso podría llegar a considerarse como una tecnología madura puesto que hay un gran número de documentos que describen tecnologías relacionadas con el diseño y mejora de transformadores de voltaje.

No obstante a lo mencionado anteriormente, el área tecnológica de los transformadores necesita constantemente innovarse ofreciendo equipos mejorados y con mayores eficiencias por lo que aunque en la actualidad existen muchas tecnologías relacionadas, se espera que en los próximos años se sigan desarrollando tecnologías de este tipo. Esto significa que existen áreas de oportunidad para el desarrollo de nuevas tecnologías relacionadas con transformadores de distribución o de mejoramiento de las tecnologías desarrolladas hasta el momento.

3.3.2. Análisis por país de origen y de publicación.

De los documentos encontrados se realizó un análisis para conocer el país de origen de dichos documentos y de esta manera identificar el país que tiene el mayor número de tecnologías desarrolladas de este tipo. La Figura 2 muestra este análisis.

China, Estados Unidos y Japón son los países con el mayor número de tecnologías desarrolladas en esta área, aunque China es claramente el líder en el diseño y desarrollo de transformadores. Otros países importantes son Korea, Reino Unido, Taiwán y Alemania, por lo que sería interesante conocer qué es lo que se está desarrollando en estos países y evaluar si se podría implementar alguna tecnología innovadora que sea de libre uso en México.

En el análisis se detectó una tecnología de México aunque no está relacionada con transformadores de distribución de alta eficiencia. La tecnología se puede identificar con el número de concesión 251108 de título "Base para transformador de pedestal". El titular de la patente es Prolec-Ge S., de R.L de C.V. La tecnología describe una base de montaje fácil, universal, ligera y fuerte, de una sola pieza para transportar y anclar cualquier tamaño de transformador eléctrico de distribución preferentemente transformadores de pedestal, sin partes móviles ni accesorios para ajustar el tamaño del transformador sobre la base de montaje.

CONFIDENCIAL

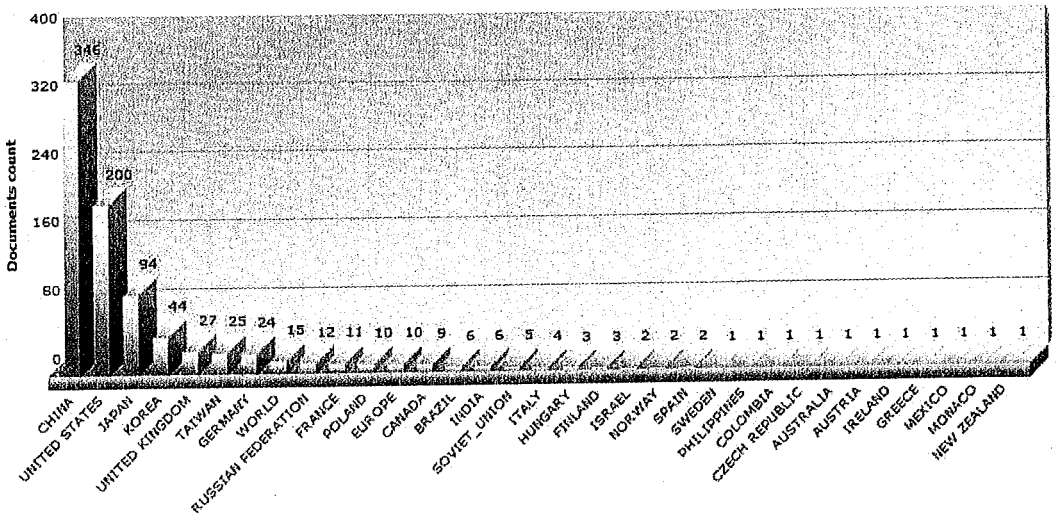


Figura 2 Principales países de origen de los documentos relacionados con transformadores de distribución.

Adicionalmente, se analizaron los países de origen principales en el tiempo para identificar en que países se ha incrementado el desarrollo de tecnologías de este tipo.

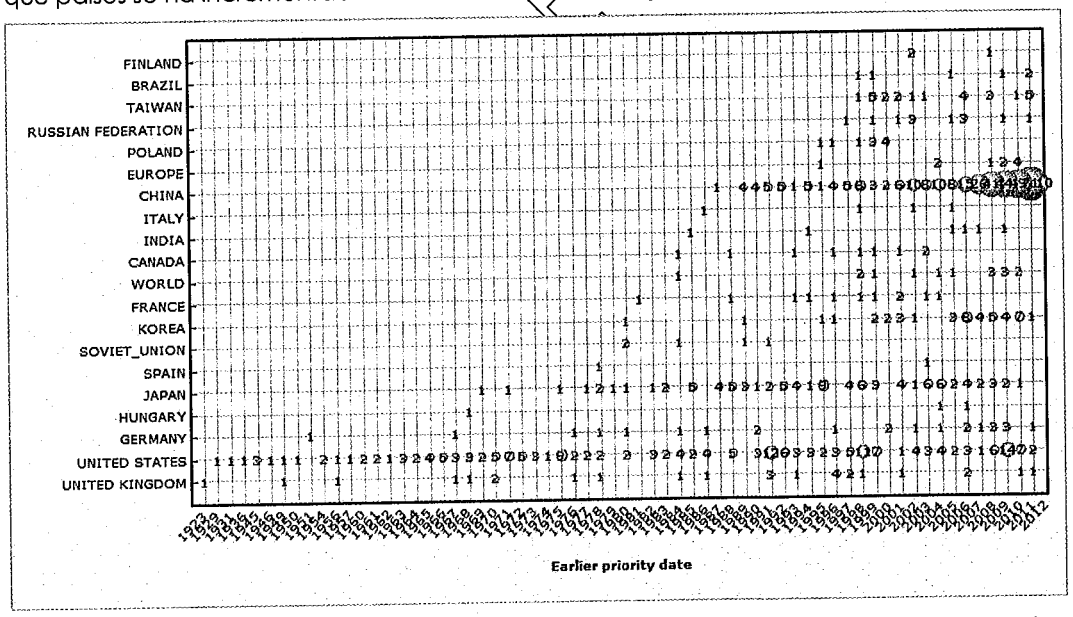


Figura 3 Países de mayor interés en tecnologías relacionadas con transformadores de distribución en el tiempo.

En la Figura 3 se observa que existen países como Estados Unidos y Reino Unido que a través del tiempo han tenido un interés constante en tecnologías relacionadas con transformadores de distribución. Alemania, Japón y Corea iniciaron poco después el desarrollo de este tipo de

tecnologías pero hasta la fecha siguen teniendo interés en ellas aunque el número de documentos que presentan no es muy grande.

En el caso de China, que fue el líder en documentos encontrados, inició el desarrollo de tecnologías relacionadas con transformadores de distribución a partir de 1989 y en los últimos 7 años ha tenido un crecimiento significativo en estos desarrollos.

Se observa que otros países como Taiwán, Rusia y Brasil en los últimos años han desarrollados algunas tecnologías en el área también aunque no son comparables con los líderes encontrados en el análisis.

Con respecto al país de publicación, se realizó un análisis para identificar cuáles han sido los países de mayor interés en esta área tecnológica a través del tiempo. La Figura 4 muestra los países en que se han presentado y publicado el mayor número de documentos relacionados con transformadores de distribución.

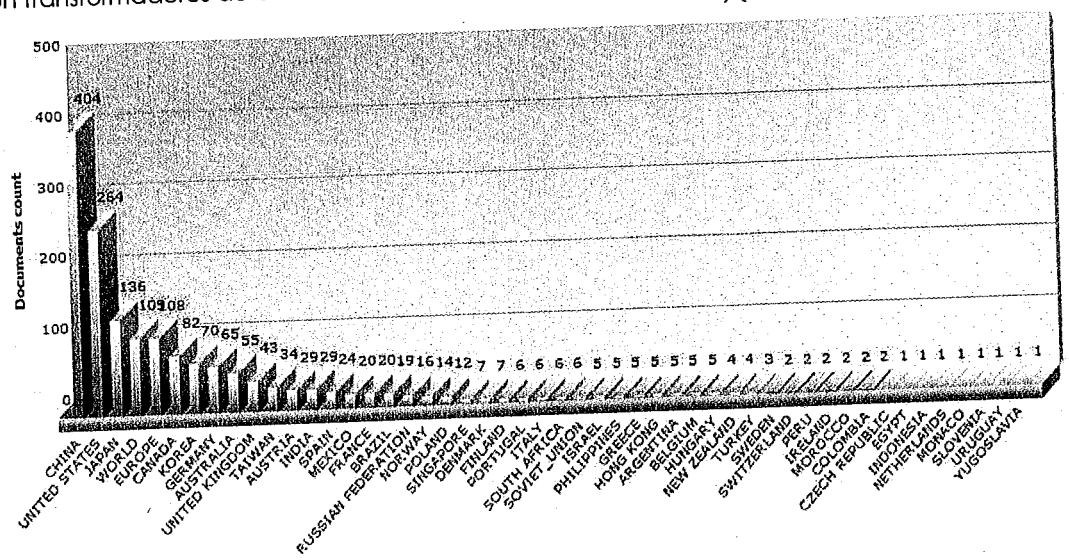


Figura 4 Países de mayor interés en tecnologías relacionadas con transformadores de distribución.

De acuerdo a la figura se observa que los mercados de mayor interés son China y Estado Unidos. Aunque también existe interés en mercados como Japón, la comunidad Europea, Canadá, Korea, Alemania, Australia, Reino Unido, Taiwán, Austria, India y España. Estos países representan los mercados potenciales principales de tecnologías de este tipo. En este análisis se encontraron 20 documentos presentados y publicados en México. Estos documentos se describirán más adelante.

Es importante mencionar que dado que algunas de las tecnologías son de años recientes, presentadas entre 2010 y 2011, podrían no estar reflejadas en esta tabla ya que de acuerdo a los procedimientos de las oficinas de patentes, no cumplen aún con los tiempos para seleccionar los países de interés. Una vez que esté disponible esta información, se recomienda monitorear el estatus de estas tecnologías para asegurarse que, si existe alguna tecnología relevante entre ellas, no sea presentada en México y evitar infracción de derechos a terceros.

3.3.3. Análisis de Competidores.

La figura 4 muestra los titulares principales en el área tecnológica de los transformadores de distribución, en función del número de documentos que han presentado.

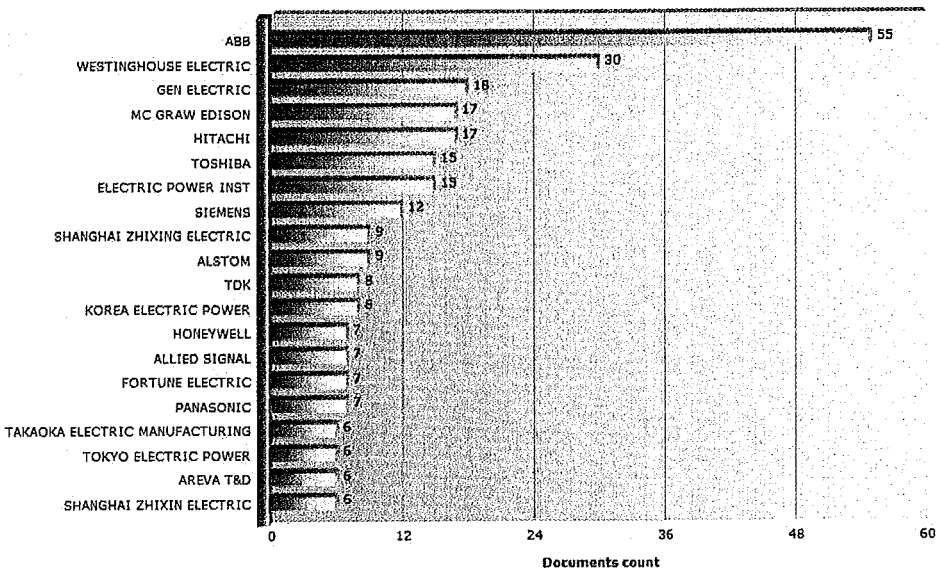


Figura 5 Principales titulares en desarrollos tecnológicos relacionados con transformadores de distribución

La empresa ABB es el líder en número de tecnologías presentadas de este tipo. En segundo lugar se encuentra Westinghouse Electric y posteriormente General Electric, MC Graw-edison of Canada Limited, Hitachi, Toshiba, State Grid Electric Power Research Institute y Siemens. Todos estos titulares se consideran competidores potenciales en el mercado de los transformadores de distribución.

Analizando la actividad que estos titulares han tenido en el tiempo, tal como se muestra en la Figura 6 se observa del año 2000 a la fecha, Westinghouse Electric y MC Graw-edison of Canada Limited no han desarrollado ninguna nueva tecnología en esta área. En el caso específico de MC Graw-edison of Canada Limited no ha tenido actividad en los últimos 20 años mientras que Westinghouse Electric, de acuerdo a los documentos encontrados, no ha presentando ninguna patente desde 1988 en esta área tecnológica. Por lo anterior, se considera que en la actualidad estas empresas no son competidores potenciales importantes ya que al no haber tenido productividad reciente, la posición de propiedad intelectual que pudieran tener frente a otras empresas es muy baja.

General Electric y Siemens han presentado unas cuantas solicitudes en los próximos años. Sin embargo, han desarrollado tecnologías en los últimos 5 años por lo que estas empresas podrían tener desarrollos relevantes para la tecnología.

ABB es sin duda el competidor principal en esta área ya que a lo largo del tiempo ha tenido una fuerte actividad y principalmente en los últimos 5 años ha desarrollado varias tecnologías. Esta empresa tiene y tendrá en los próximos años una posición fuerte tanto comercial como de de propiedad intelectual en el área, lo que lo convierte también en un aliado tecnológico

potencial para el desarrollo de nuevas tecnologías y para el diseño de transformadores de distribución mejorados.

Se observa también a otros titulares que recientemente han desarrollado tecnologías de este tipo. Los más importantes serían: State Grid Electric Power Research Institute, Korea Electric Power Corporation y Shanghai Zhixing Electric CO. LTD. Estos titulares podrían convertirse en los próximos años en competidores y/o aliados tecnológicos importantes para el desarrollo de nuevos transformadores de distribución.

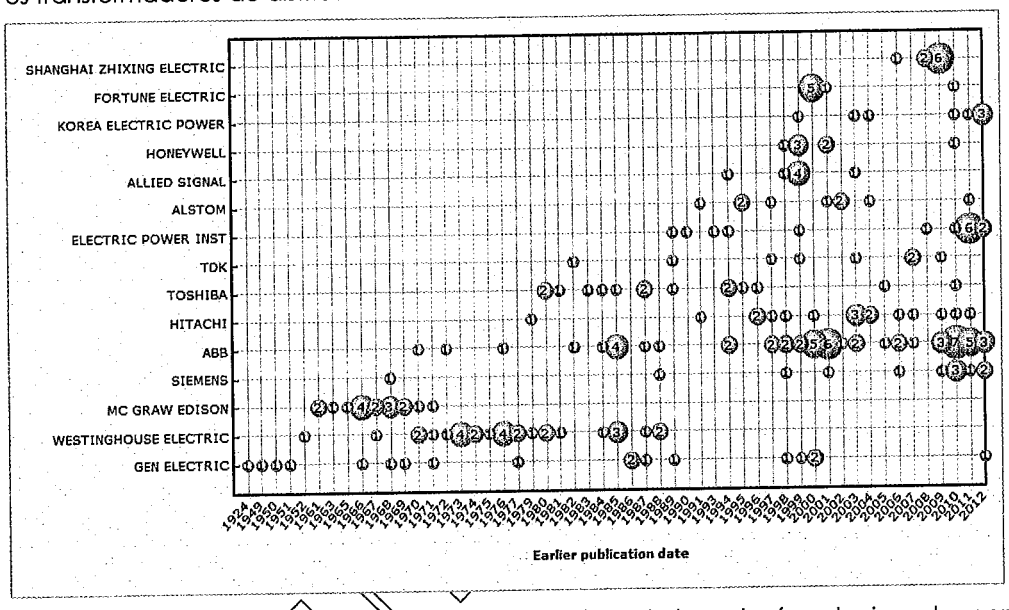


Figura 6 Actividad de los principales titulares en el área de tecnologías relacionadas con transformadores de distribución

3.3.4. Análisis general y documentos relevantes encontrados en México.

Para el análisis de las tecnologías relacionadas con transformadores de distribución en México, se tomaron como base los documentos encontrados en las bases internacionales. Se hizo una búsqueda de equivalentes de los 886 documentos encontrados para identificar si alguno se había encontrado en México.

De esta búsqueda, 27 documentos equivalentes se encontraron en México relacionados con transformadores de distribución. El Anexo A describe los documentos equivalentes encontrados en México.

Es importante mencionar que los documentos encontrados en la base de datos reportados en la búsqueda general que tienen número de prioridad posterior a Junio de 2010 todavía pueden ser presentados en México. Por lo anterior, se recomienda que, si existe una tecnología de interés que no tiene equivalente en México, se verifique de manera regular dicho equivalente para asegurar su libre uso en México y evitar infracción de derechos de terceros.

Adicionalmente, se realizó una búsqueda general con palabras claves en la base de datos del IMPI. Las palabras claves utilizadas fueron: transformador de distribución, subterráneo, de poste, pedestal y subestación.

En total se encontraron 36 documentos y en el Anexo B se describe la información más relevante de estos documentos.

Una vez encontrados los documentos relevantes en México que estaban relacionados con transformadores de distribución, se realizó un análisis para identificar a los competidores y/o aliados tecnológicos más importantes. La Figura 7 muestra los titulares principales encontrados en México a partir de los 63 documentos encontrados en México.

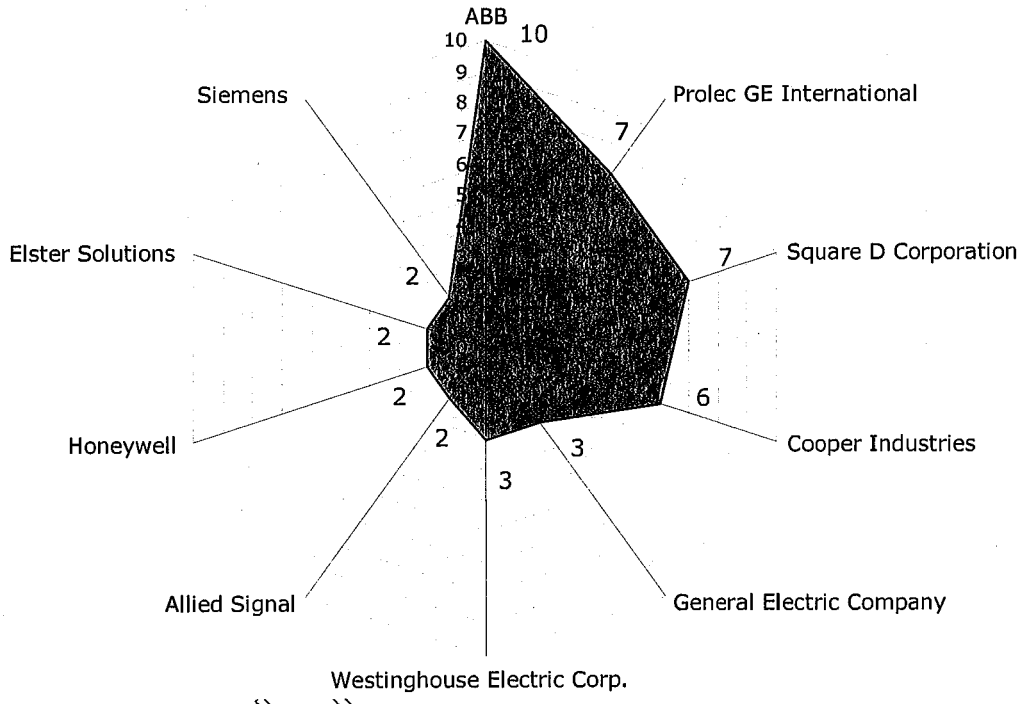


Figura 7 Principales titulares en México para tecnologías que describen transformadores de distribución

Como puede observarse, ABB es el principal titular en México en tecnologías para transformadores de distribución seguido de Prolec GE International, Square D Corporation y Cooper Industries. Estas empresas pueden ser un aliado tecnológico importante, principalmente ABB quien también es una empresa líder en tecnologías de transformadores a nivel mundial. No obstante, si se considera a Prolec-GE con General Electric Company como uno solo, esto los coloca con el mayor número de estas tecnologías en el área de transformadores de distribución en México empatados con ABB.

Otra empresa que aparece es Westinghouse Electric, que ya antes había sido identificada también como competidores y/o aliados tecnológicos potenciales.

No se detectó actividad relevante de ninguna Universidad o Centro de Investigación en México que estuviera desarrollando tecnologías de este tipo. Por lo que la recomendación principal es que si se buscan alianzas tecnológicas para el desarrollo y mejora de transformadores de distribución se haga considerando cuidadosamente los documentos de los titulares mencionados anteriormente, para evitar infringir estas patentes, centrándose probablemente en documentos que no hayan sido detectados en México, o bien que se encuentren caducos o abandonados en México.

Es importante enfatizar sobre el párrafo anterior respecto de no utilizar las tecnologías descritas en las patentes del Anexo A y el Anexo B como vigentes puesto que están tecnologías no son de libre uso en México y se correría el riesgo de infringir patentes de terceros. Por el contrario, las patentes que se encuentran marcadas como vencidas pueden utilizarse libremente. Para el caso de las solicitudes de patente descritas, habría que hacer un análisis más a fondo para analizar si ya fueron abandonadas o si todavía existe la posibilidad de que sean otorgadas, análisis que deberá hacerse solamente si alguno de estos documentos resulta fundamental para el diseño de un nuevo transformador de alta eficiencia.

Se recomienda que cuando se definan las tecnologías de interés para el desarrollo y mejora de transformadores de distribución, se realice un análisis de libre uso de las tecnologías para evitar la infracción de derechos de terceros, por lo que este análisis no debe considerarse una opinión legal al respecto.

A partir del análisis general de competidores realizado se concluyó lo siguiente:

1. La tecnología analizada se puede considerar en etapa de desarrollo puesto que aún no se observa un estancamiento en el ciclo de vida de la tecnología. Sin embargo, de acuerdo a la curva, el desarrollo en que se encuentra es avanzado puesto que hay un gran número de documentos que describen tecnologías relacionadas con el diseño y mejora de transformadores de voltaje.

2. No obstante a lo mencionado anteriormente, el área tecnológica de los transformadores necesita constantemente innovarse ofreciendo equipos mejorados y con mayores eficiencias por lo que existen áreas de oportunidad para el desarrollo de nuevas tecnologías relacionadas con transformadores de distribución o de mejoramiento de las tecnologías desarrolladas hasta el momento.

3. China, Estados Unidos y Japón son los países con el mayor número de tecnologías desarrolladas en esta área.

4. Los mercados de mayor interés son China, Estado Unidos, Japón, la comunidad Europea, Canadá, Korea, Alemania, Australia, Reino Unido, Taiwán, Austria, India y España. Estos países representan los mercados potenciales principales de tecnologías de este tipo.

5. ABB es el competidor principal en esta área ya que a lo largo del tiempo ha tenido una fuerte actividad y principalmente en los últimos 5 años ha desarrollado varias tecnologías. Esta empresa tiene y tendrá en los próximos años una posición fuerte tanto comercial como de de propiedad intelectual en el área, lo que lo convierte también en un aliado tecnológico potencial para el desarrollo de nuevas tecnologías y para el diseño de transformadores de distribución mejorados.

6. Existen otros titulares interesantes como: Grid Electric Power Research Institute, Korea Electric Power Corporation y Shanghai Zhixing Electric CO. LTD. que podrían convertirse en los próximos años en competidores y/o aliados tecnológicos importantes para el desarrollo de nuevos transformadores de distribución.

7. En México ABB y Prolec GE/General Electric son los titulares principales en tecnologías de este tipo. Square D Corporation y Cooper Industries parecen ser también competidores y/o aliados tecnológicos importantes para el desarrollo de tecnologías de transformadores de distribución.

8. No se encontraron documentos relevantes de centros de investigación, por lo que es necesario tener especial cuidado con las patentes para no infringir derechos de las empresas que se encuentran desarrollando tecnologías en esta área.

CONFIDENCIAL

3.4. *Documentos relevantes de acuerdo a las características de la Norma Mexicana*

A partir del análisis general realizado, se identificaron los documentos relevantes que podrían utilizarse para el cumplimiento de las características descritas en la Norma Mexicana NOM-002-SEDE-2010. Aunque los documentos se clasificaron en una sola característica, hay documentos que podrían clasificarse en más de una.

De los 886 documentos encontrados, 416 no fueron clasificados en ninguna categoría, probablemente porque son documentos que no contienen las palabras claves utilizadas para la identificación o porque son documentos generales que pueden aplicarse para cualquier tipo de transformador de distribución. La información más relevante de estos documentos se encuentra en el Anexo C.

De los documentos descritos en el Anexo C, existen 12 equivalentes presentados en México. Estos documentos son:

NO. DE PUB.	TÍTULO	TITULAR	STATUS
MX142888	MEJORAS EN INTERRUPTOR DE CIRCUITO ELECTRICO	ABB POWER T&D COMPANY INC.	Vencida
MX154752	MEJORAS EN UN NUCLEO FERROMAGNETICO PARA TRNSFORMADOR ELECTRICO Y METODO PARA FABRICARLO	ABB POWER T&D COMPANY INC.	Vencida
MX/a/2011/013039	MEDIO DE AISLAMIENTO DIELECTRICO.	ABB TECHNOLOGY	En trámite
PA/a/2000/005158	TRANSFORMADOR.	ABB ABB VAESTERAAS	En trámite
MX219360	NUCLEOS Y BOBINAS PARA TRANSFORMADORES ELECTRICOS.	ALFONSO HERNANDEZ CRUZ COMPANIA MANUFACTURERA DE ARTEFACTOS ELECTRICOS	Vigente
MX9200046	PROTECCION INTEGRADA PARA SOBRE-CORRIENTE Y SOBRE-VOLTAJE PARA DEVANADO SECUNDARIO DE TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION.	COOPER POWER SYSTEM	Vencida
MX/a/2010/005232	FLUIDOS DE AISLAMIENTO ELECTRICO PARA USAR EN UN APARATO ELECTRICO.	DU PONT DE NEMOURS	En trámite
MX/a/2011/001701	ENSAMBLE DE INTERRUPTOR AUTONOMO Y METODOS DE USO ASOCIADOS.	H J INTERNATIONAL	En trámite

CONFIDENCIAL

MX273029	TRANSFORMADOR DE NUCLEOS TORIDALES	HANSER VOLKER WERNER VOLKER HANSER	Vigente
MX145583	MEJORAS EN APARATO DE CONVERSION DE ENERGIA ELECTRICA	JGF MICROSOURCE	Vencida
MX/a/2008/005301	DISPOSITIVOS INDUCTIVOS Y TRANSFORMADORES UTILIZANDO EL SISTEMA DE TRANSFORMACION DE REACTANCIA TRU-SCALE PARA SISTEMAS DE CORRIENTE MEJORADOS.	META C	En trámite
MX275709	ENSAMBLES Y TRANSFORMADORES ELECTRICOS.	TYCO ELECTRONICS	Vigente

Para la clasificación por palabra clave, primeramente se realizó por tipo de transformador de distribución de acuerdo a la norma: pedestal, poste, subestación y sumergible.

3.4.1. Documentos relevantes relacionados con transformadores de distribución tipo pedestal.

En total se encontraron 55 documentos relacionados con transformadores de distribución de tipo pedestal. La información más relevante de estos documentos se encuentra en el Anexo D.

En la Figura 8 se puede observar una gráfica que muestra el top 15 de los titulares más importantes que han desarrollado tecnologías relacionadas con transformadores de distribución de tipo pedestal con respecto a la fecha de primera publicación del documento.

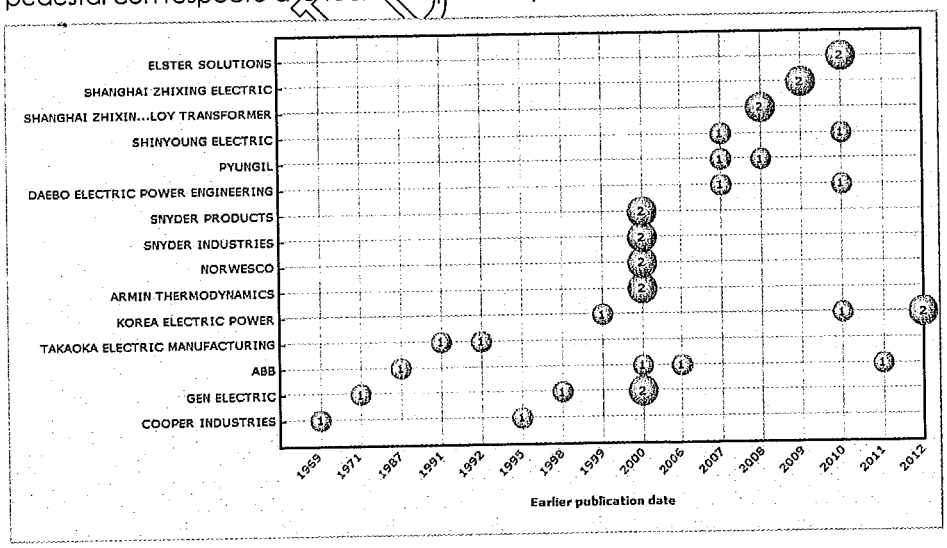


Figura 8 Titulares principales que desarrollan tecnologías relacionadas con transformadores de distribución tipo pedestal.

Haciendo un análisis de las empresas líderes en el desarrollo de este tipo de transformador en el tiempo, se observa que a partir del año 2000, en general se tuvo un ligero incremento en el número de tecnologías desarrolladas para transformadores de distribución de tipo pedestal.

Considerando el número de documentos presentados en esta área, los titulares más importantes que se pueden observar a partir de la figura son ABB, Korea Electric Power Corporation y General Electric. Aunque de estos, en los últimos años, solamente una tecnología ha sido desarrollada por ABB.

Aunque el número de documentos encontrados no fue muy significativo para definir una tendencia en los transformadores de distribución tipo pedestal, se observa que los titulares Elster Solutions de Estados Unidos; Shanghai Zhixing Electric CO. LTD., Shanghai Zhixin Amorphous Alloy Transformer CO. LTD. y Shinyoung Electric de China; y Pyungil y Daebo Electric Power Engineering de Corea, han mostrado un mayor interés en el desarrollo de transformadores de distribución de tipo pedestal en los últimos años.

Adicionalmente, son pocos los documentos anteriores a 1993, por lo que es probable que las tecnologías más pertinentes aún se encuentren vigentes en algunos países.

Es importante mencionar que los documentos encontrados en esta categoría mencionaban específicamente a los transformadores de distribución de tipo pedestal sin embargo, existen otros documentos encontrados más generales que describen tecnologías que pudieran ser relevantes también para este tipo de transformadores.

Los documentos equivalentes de estos documentos encontrados en México se mencionan a continuación.

3.4.2. Documentos relevantes relacionados con transformadores de distribución tipo poste.

En el caso de los transformadores de distribución de tipo poste, se encontraron 40 documentos. ABB es la empresa líder en el número de documentos presentados para este tipo de transformador. Sin embargo, no han tenido actividad importante en los últimos años pues en 2010 sólo se identifica un documento presentado por esta empresa.

La Figura 9 muestra el análisis para este tipo de transformadores.

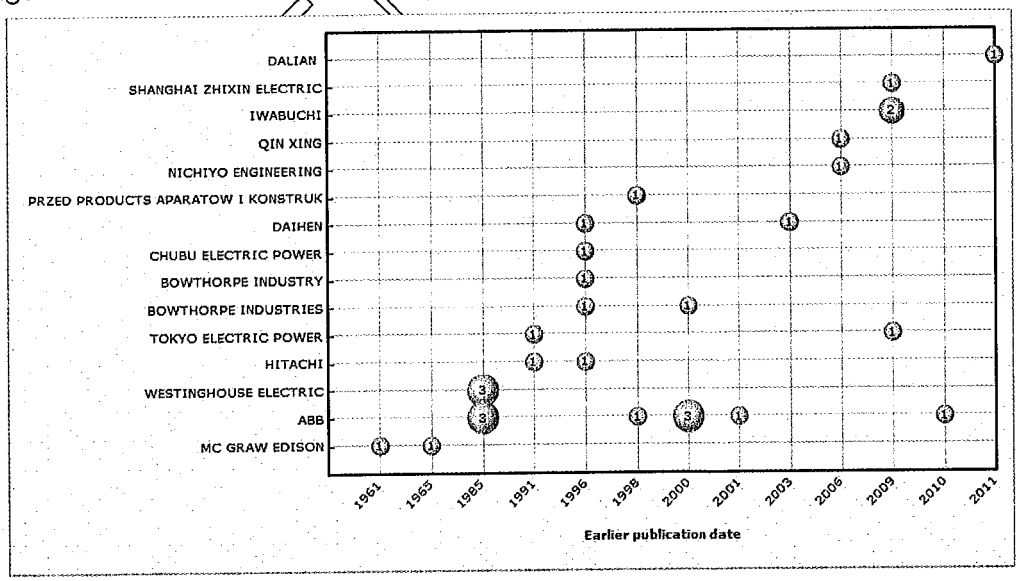


Figura 9 Titulares principales que desarrollan tecnologías relacionadas con transformadores de distribución tipo poste.

Al contrario de lo observado en los transformadores de distribución de tipo pedestal, el desarrollo de tecnologías para transformadores de tipo poste fue "mayor" hasta antes del año 2001. A partir de este año, el número de tecnologías identificadas disminuyó.

Del año 2006 a la fecha se han presentado algunos documentos relacionados con este tipo de transformador principalmente por parte de empresas japonesas y chinas.

La información más relevante de los documentos encontrados en esta categoría se puede observar en el Anexo E.

Al igual que en el caso anterior, pueden existir otros documentos que aunque no menciona expresamente transformadores de distribución de tipo pedestal, podrían ser relevantes para el diseño y mejora de este tipo de transformadores, principalmente aquéllos documentos que describen devanados y núcleos magnéticos con características especiales.

En esta categoría se encontró solamente un equivalente en México.

NO. DE PUB.	TÍTULO	TITULAR	STATUS
MX/a/2012/001173	TRANSFORMADOR DE TIPO SECO MONTADO EN UN POSTE.	ABB TECHNOLOGY	En trámite

Debido a lo reciente de este documento el tiempo de protección de otorgarse sería largo, de modo que debe evitarse su uso, o bien, monitorear el estado del trámite del mismo.

3.4.3. Documentos relevantes relacionados con transformadores de distribución en subestación.

En esta categoría podrían clasificarse muchos de los documentos encontrados sin embargo, siguiendo la metodología de análisis que se siguió en los otros casos, se encontraron 17 documentos que expresamente estaban relacionados con transformadores de distribución en subestación. De la Figura 10 se puede observar que, aunque son pocos los documentos detectados, son muy recientes.

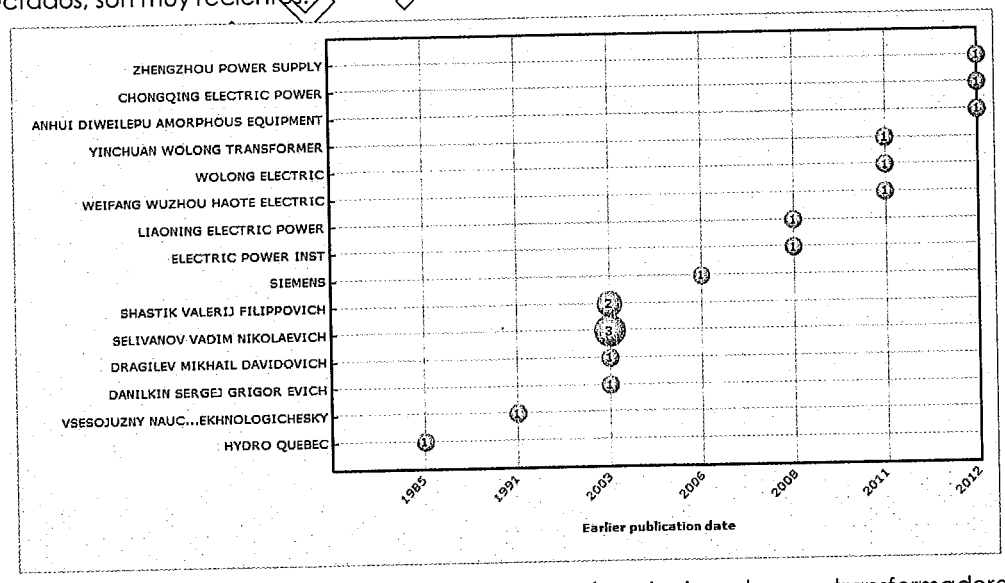


Figura 10 Titulares principales que desarrollan tecnologías relacionadas con transformadores de distribución en subestación.

De estos documentos los titulares más importantes fueron dos empresas rusas Shastik Valerij Filippovich y Selivanov Nikolaj Pavlovich, aunque los documentos encontrados de estas empresas se publicaron en 2003.

Considerando que los documentos publicados en el año 2003 (donde de acuerdo a la gráfica se observa el mayor número de documentos) y los del años 2012, fueran otorgados, éstas tecnologías estarían vigentes hasta aproximadamente entre 10 y 20 años más. Por lo que sería interesante analizar las tecnologías que se han desarrollado en este tipo de transformadores para analizar si son relevantes y evaluar la factibilidad de implantación en México.

La información más importante de los documentos detectados en esta categoría se muestra en el Anexo F. En esta clasificación se encontró también solamente un documento equivalente en México.

NO. DE PUB.	TÍTULO	TITULAR	STATUS
MX/a/2008/000268	SISTEMA Y METODO PARA MONITOREO CENTRALIZADO DE TRANSFORMADOR DE ENERGIA DISTRIBUIDO.	SIEMENS LIMITING FREE	En trámite

Este documento debe estar por otorgarse, por lo que en caso de ser relevante para el diseño es recomendable establecer una vigilancia para determinar si se otorga, y en su caso, el alcance de sus reivindicaciones.

3.4.4. Documentos relevantes relacionados con transformadores de distribución sumergibles.

En total se encontraron 15 documentos. El titular más importante en este tipo de tecnologías es China Eastar. Al igual que en los transformadores en subestación, el número de documentos encontrado en esta clasificación es pequeño y las tecnologías descritas en esta categoría son recientes (2011). Esto podría significar además que en los próximos años podrían desarrollarse un mayor número de tecnologías relacionadas con transformadores de distribución sumergibles por lo que se considera que podrían existir áreas de oportunidad en los próximos años en el diseño y mejora de transformadores de distribución tanto de subestación como sumergibles.

En el Anexo G se menciona la información relevante de los documentos identificados en la categoría de transformadores de distribución sumergibles. En esta clasificación no se encontraron equivalentes en México.

Después de clasificar los documentos encontrados en los tipos de transformadores de distribución mencionados en la Norma Mexicana NOM-002-SEDE-2010, se trató de identificar las tecnologías que pudieran ayudar a cumplir los requisitos energéticos y de seguridad que se mencionan en la norma. En este caso, las características utilizadas para la clasificación de los documentos fueron: alta eficiencia, pérdida de cobre o hierro, pérdida de calor, hermeticidad o sellado, pérdida magnética, corto circuito, pérdida de presión y redes o circuitos eléctricos.

- Documentos encontrados relacionados con transformadores de distribución de alta eficiencia

Para cumplir con los requisitos de eficiencia de la norma, se hizo una búsqueda de documentos que mencionaran transformadores de distribución de alta eficiencia. En esta clasificación encontramos 84 documentos. El criterio de selección de los documentos fue en base a las palabras alta eficiencia aunque no se especificó en cual característica del transformador se observa la mejora en la eficiencia por lo que estos documentos son generales.

Al hacer el análisis de titulares se encontró que todos ellos tienen presentadas entre dos y un documento por lo que no se define un titular líder a partir de los documentos encontrados. Honeywell, Square D y Shangai Municipal Electric Power son los titulares con dos documentos.

CONFIDENCIAL

Es importante mencionar que muchas de estas tecnologías han sido desarrolladas recientemente por lo que se consideran tecnologías que no son de libre uso en México. A continuación se mencionan los equivalentes encontrados en México y su estatus.

NO. DE PUB.	TÍTULO	TITULAR	STATUS
MX226056	TRANSFORMADOR DE METAL AMORFO QUE TIENE UNA BOBINA GENERALMENTE RECTANGULAR.	HONEYWELL	Vigente
MX219459	NUCLEO HIBRIDO EFICIENTE EN ENERGIA.	PROLEC GE INTERNACIONAL	Vigente

Muy probablemente en los próximos años se desarrollarán un mayor número de tecnologías de este tipo lo cual es un reflejo de la tendencia que se ha observado en la búsqueda y desarrollo de tecnologías con características mejoradas y que sean amigables al medio ambiente. De acuerdo a lo anterior, es claro que en esta área tecnológica existen oportunidades importantes de desarrollos tecnológicos que valdría la pena explotar por medio de una alianza tecnológica con empresas o con centros de investigación para lograr desarrollar tecnología de punta que cumpla con los estándares establecidos en normas nacionales e internacionales.

Haciendo un análisis en el país de origen de los documentos identificados con la característica de transformadores de alta o mejorada eficiencia se encontró que China es el país líder en este tipo de tecnologías por lo que sería interesante revisar los desarrollos tecnológicos que en este país se han estado llevando a cabo. Después de China, los países con participación importante en el desarrollo de tecnologías de transformadores de distribución de alta eficiencia son Estados Unidos y Japón.

Se recomienda revisar los documentos descritos en estos países para identificar tecnologías que puedan ser adaptadas en México para desarrollar transformadores de distribución de alta eficiencia que cumplan con las modificaciones recientes que se hicieron en las normas mexicanas. La Figura 11 muestra este análisis mientras que en el Anexo H se muestra a información más relevante de estos documentos.

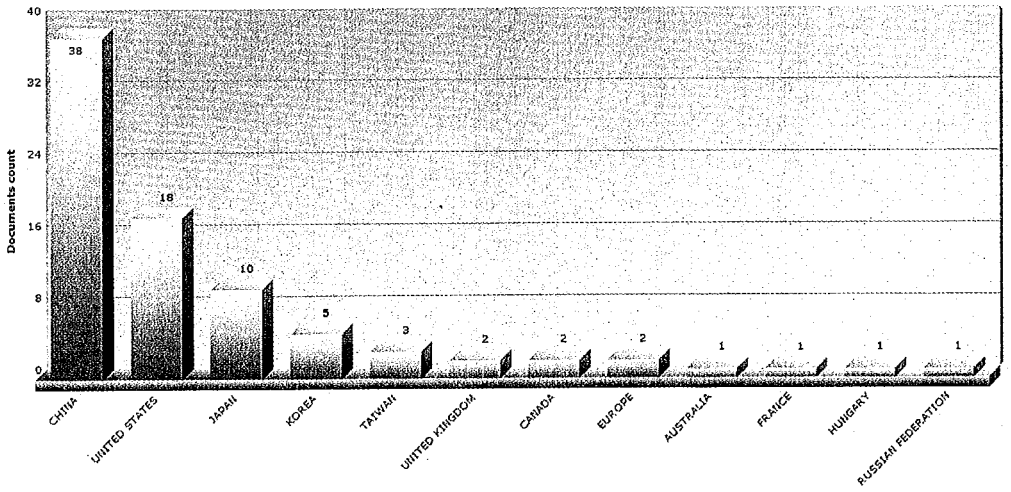


Figura 11 País de origen principal de los titulares identificados con documentos de transformadores de distribución con alta o mejorada eficiencia.

- Documentos encontrados relacionados con transformadores de distribución que evitan pérdidas de calor, hierro (en el núcleo), cobre (en el núcleo) y vacío.

Como parte del análisis de la norma mexicana con respecto a los requisitos de seguridad y eficiencia de los transformadores de distribución de alta eficiencia, también se consideraron aquéllos que ayudaban a evitar o disminuir las pérdidas de calor, de hierro (del núcleo) de cobre (del núcleo) y/o de vacío dentro del transformador. En esta clasificación encontramos 89 documentos que mencionaran explícitamente en el título, resumen o reivindicaciones al menos una de estas características. El Anexo I menciona los documentos encontrados en esta categoría. En esta categoría no se encontraron documentos equivalentes en México.

La Figura 12 nos muestra el desarrollo que ha tenido este tipo de tecnologías en el tiempo. Como puede observarse, y como ya se menciono antes, la tendencia en este tipo de tecnologías va en aumento. En años anteriores el desarrollo de tecnologías que evitaran pérdidas en el transformador se había mantenido relativamente constante hasta 2006 en donde se observa un incremento de este año en delante de tecnologías de transformadores de distribución con características mejoradas en pérdida de calor, de vacío, de hierro y cobre que son aspectos que afectan la eficiencia de un transformador.

Con respecto a los titulares más importantes, a partir del análisis de los documentos de esta categoría se encontraron como líderes a Shangai Zhixing Electric, Toshiba y Jianxi No 2 Electric Power Equipment. Otros competidores y/o aliados potenciales son Changshu Changyuan Transformer, Kawasaki, Mitsubushi, Shangai Zhixin Electric, Allied Signal y Hitachi.

Se recomienda analizar estas tecnologías para identificar si hay alguna de interés que ayude a cumplirlos requerimiento de la norma mexicana.

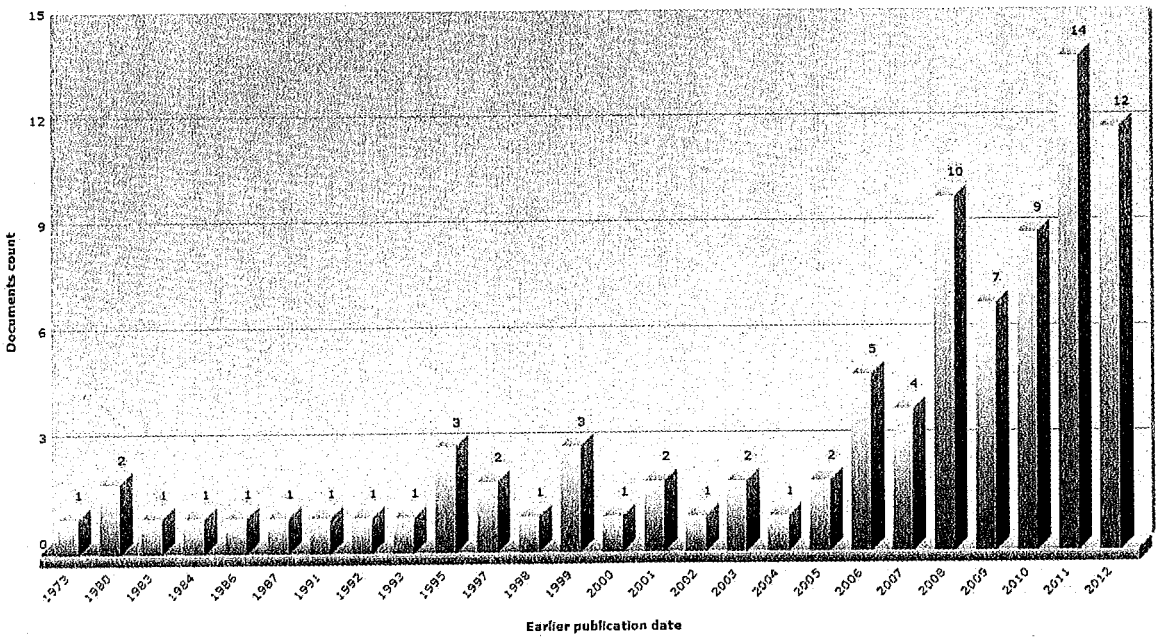


Figura 12 Número de documentos encontrados que describen desarrollos de tecnologías que evitan o disminuyen pérdidas de calor, vacío, hierro y cobre en transformadores.

- Documentos encontrados relacionados con transformadores de distribución que evitan pérdidas magnéticas.

Con respecto a los documentos que describen tecnologías que permiten evitar o disminuir las pérdidas magnéticas en el núcleo, se encontraron 39 documentos. La Figura 13 muestra el Top 10 de los titulares principales encontrados en esta clasificación.

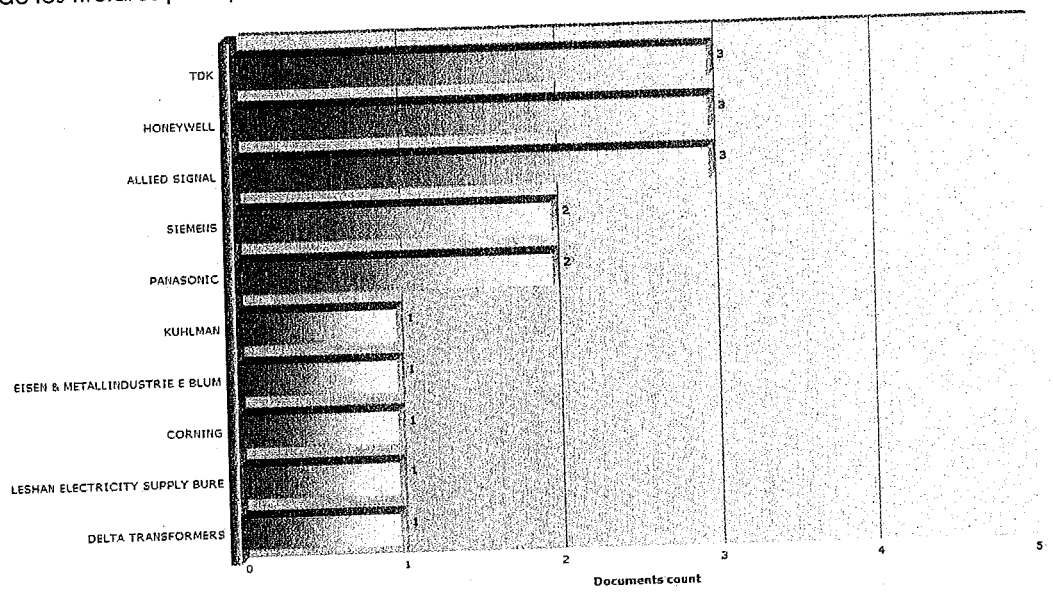


Figura 13 Titulares principales que desarrollan tecnologías relacionadas con tecnologías que evitan o disminuyen pérdidas magnéticas en transformadores de distribución.

En este tipo de tecnologías, TDK Corporation de Japón y Honeywell de Estados Unidos son los titulares líderes. Siemens y Panasonic también figuran como líderes importantes en esta clasificación. Es importante mencionar que el desarrollo de este tipo de tecnologías ha disminuido ya que de acuerdo a los documentos encontrados, en los últimos 12 años se han presentado solamente 6 documentos. Esto podría significar que el interés en este tipo de tecnologías ha disminuido y/o que el desarrollo de otras tecnologías, como las descritas en el inciso anterior, tiene un mayor impacto en la eficiencia de los transformadores de distribución y por lo tanto han tenido un mayor crecimiento tecnológico en los últimos años.

En el Anexo J se describen las tecnologías encontradas en este análisis. Los documentos equivalentes encontrados se mencionan a continuación.

NO. DE PUB.	TÍTULO	TITULAR	STATUS
MX244154	NUCLEO DE TRANSFORMADOR SEGMENTADO.	ALLIED SIGNAL HONEYWELL	Vigente
MX/a/2011/007988	CONEXION DE DEVANADOS PARA SUMINISTRAR POTENCIA TRIFASICA A PARTIR DE UNA ALIMENTACION BIFASICA Y TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION 2X3.	CODENSA	En trámite

- Documentos encontrados relacionados con transformadores de distribución que tienen la características de ser herméticos o sellados

En la norma mexicana NOM-002-SEDE-2010 se mencionan también además de los requisitos de eficiencia, requisitos de seguridad dentro de los cuales se encuentra la hermeticidad que debe de tener el transformador de distribución. Por ellos se identificaron aquéllos documentos que describieran la característica de hermeticidad en los transformadores. En esta búsqueda se encontraron en total 77 documentos.

Los equivalentes encontrados en México son:

NO. DE PUB.	TÍTULO	TITULAR	STATUS
MX177706	CONJUNTO DE TRANSFORMADOR QUE TIENE ALETAS DE ENFRIAMIENTO Y METODO DE PROVEERLO	COOPER POWER SYSTEM	Vencida
MX/a/2011/012296	MONTAJE DE TANQUE PARA TRANSFORMADOR ENCOFRADO DE 1 FASE QUE EVITA ABERTURAS DE PANELES	COOPER TECHNOLOGIES	En trámite
MX/a/2010/001276	METODO Y APARATO PARA MEDIR LA SALIDA DE CORRIENTE DE TRANSFORMADORES DE ENERGIA DE DISTRIBUCION DE BAJO VOLTAJE MONTADOS SOBRE COJINETE.	ELSTER SOLUTIONS	En trámite

La Figura 14 muestra la línea de tiempo con los titulares principales en el desarrollo de estas tecnologías.

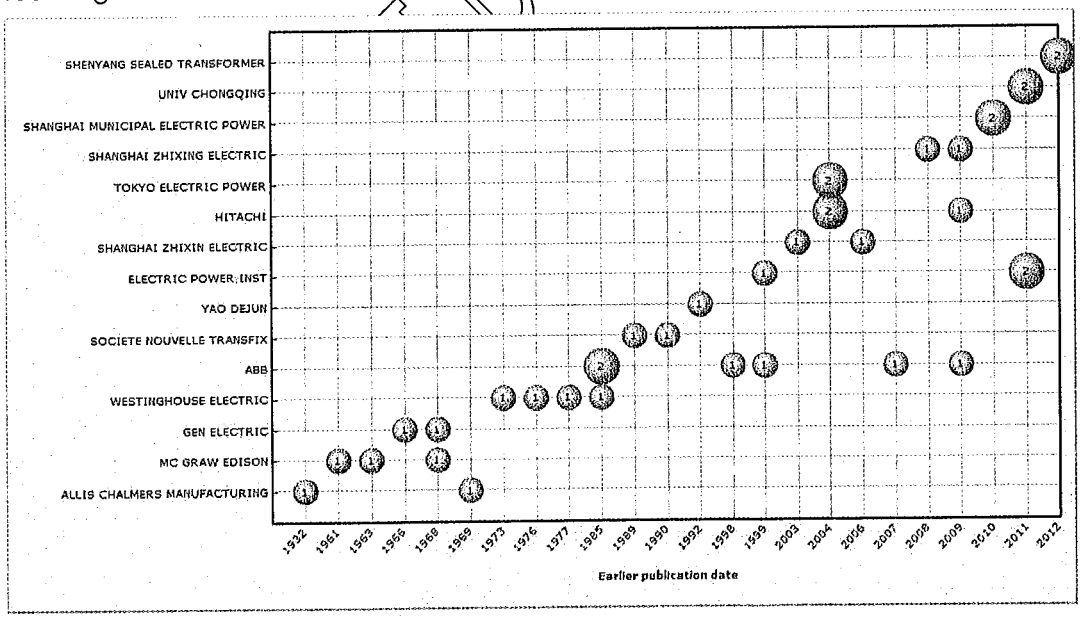


Figura 14 Titulares principales que desarrollan tecnologías relacionadas con transformadores herméticos o sellados

ABB es el líder en el desarrollo de tecnologías de este tipo aunque no ha tenido actividad importante en los últimos años. Mientras que los titulares chinos Shenyang Sealed Transformer, Universidad Chongqing, Shangai Municipal Electric Power, Shanghai Zhixing Electric y Electric Power Institute han tenido el mayor desarrollo de este tipo de tecnologías de 2008 a la fecha.

En el Anexo K se encuentra la información relevante de estos documentos.

- Documentos encontrados relacionados con transformadores de distribución que evitan o disminuyen los cortocircuitos.

Otra característica de seguridad descrita en la norma mexicana es la referente a los cortocircuitos. De los documentos analizados 40 documentos hacen referencia a los cortocircuitos.

Con respecto al análisis realizado observamos que en este tipo de tecnologías los titulares con desarrollos más novedosos son Shanghai Intelligence Power Electric Engineering, Chongqing Xinghan Electric Power Technology, Shanghai Municipal Electric Power, Jinan Faao Electric, Shnaghai Zhixing Electric y Lien Chang Electronic.

Los titulares líderes en esta categoría son las empresas Alstom/Areva T&D. Se puede observar que aunque esta empresa presentó sus tecnologías "más recientes" en 2004, la mayoría de las tecnologías que han desarrollado (en caso de que se les haya otorgado la patente) estarían protegidas hasta aproximadamente 8 años más por lo que hay que poner especial atención en estas tecnologías.

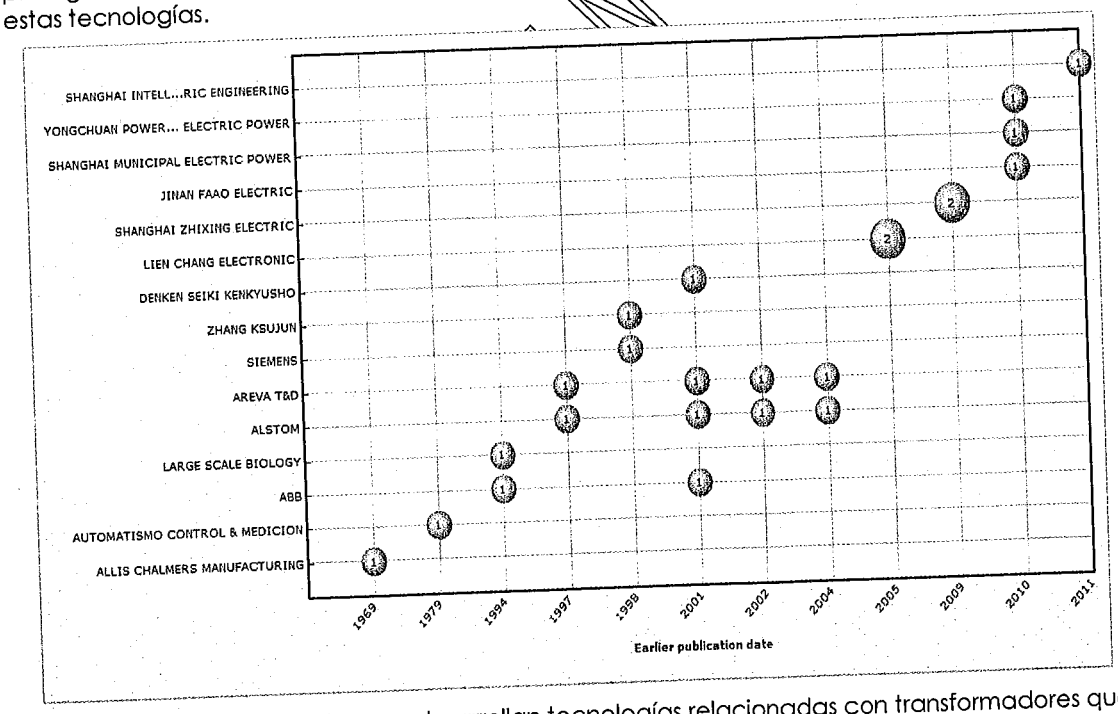


Figura 15 Titulares principales que desarrollan tecnologías relacionadas con transformadores que disminuyen o evitan los cortocircuitos

En el Anexo L podrán encontrarse la descripción de estas tecnologías. No se encontró ningún equivalente en México de esos documentos.

- Documentos encontrados relacionados con redes eléctricas de transformadores de distribución.

Finalmente, los documentos fueron analizados también con respecto a los que describían redes eléctricas en donde se utilizaran transformadores de distribución. Se encontraron 27 documentos que describieran esta característica que además podrían ser relevantes para el cumplimiento de la norma mexicana NOM-001-SEDE-2012 que habla principalmente sobre la utilización de instalaciones eléctricas en general. El Anexo M menciona las tecnologías encontradas en esta clasificación. En esta categoría se encontró solamente un equivalente en México.

NO. DE PUB.	TÍTULO	TITULAR	STATUS
MX224516	SISTEMA DE TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION, ENFRIADO A TIERRA, Y METODO.	PROLEC GE INTERNACIONAL	Vigente

Como ya se mencionó anteriormente, es importante que los documentos reportados en los anexos que tienen número de prioridad posterior a Junio de 2010 sean verificados de manera regular ya que todavía pueden ser presentados en México.

3.5. Cliente y/o mercados potenciales para la tecnología.

De acuerdo a lo comentado en el apartado 3.3.2. del presente reporte, desde un punto de vista territorial, los mercados de mayor interés encontrados a partir del análisis son China, Estados Unidos, Japón, la comunidad Europea, Canadá, Corea, Alemania, Australia, Reino Unido, Taiwán, Austria, India y España.

China, Estados Unidos y Japón son países líderes en el desarrollo de estas tecnologías por lo que se observa que existe una necesidad importante en estos países que el mercado actual aún no ha logrado cubrir.

Adicionalmente a la información obtenida a partir del análisis de los documentos encontrados, se hizo una búsqueda general del mercado global y nacional de transformadores de distribución.

3.5.1. Mercado global de equipos eléctricos.

De manera general, el mercado global de equipos eléctricos[2] creció aproximadamente 4.4% en 2011 alcanzando un valor de $202 billones de dólares en ese año. La tabla 1 muestra un panorama general del mercado global desde 2007.

Año	$ billón	€ billón	% Crecimiento
2007	193.2	138.8	
2008	194.1	139.5	0.5%
2009	177.2	127.4	(8.7%)
2010	193.4	139.0	9.1%
2011	202.0	145.2	4.4%
CAGR: 2007-2011			1.1%
FUENTE: MARKETLINE			

Tabla 1 Panorama general del mercado global de los equipos eléctricos

[2] MarketLine Industry Profile Global Electrical Equipment, Abril de 2012

CONFIDENCIAL

En este mismo reporte, se hace una proyección del mercado global de equipos eléctricos en donde se observa, a partir de la tabla 2, que en 2016 el mercado global aumentará hasta 254.7 billones de dólares con un índice compuesto de crecimiento anual (CAGR) de aproximadamente 4.7% entre 2011 y 2016.

Año	$ billón	€ billón	% Crecimiento
2011	202.0	145.2	4.4%
2012	208.9	150.2	3.4%
2013	218.8	157.2	4.7%
2014	229.2	164.7	4.8%
2015	242.1	174.0	5.7%
2016	254.7	183.1	5.2%
CARG: 2011-2016			4.7%
			FUENTE: MARKETLINE

Tabla 2 Proyección del mercado global de los equipos eléctricos hasta 2016

Como puede observarse, las necesidades de mercado de este tipo de equipos se irán incrementado a través de los años lo cual tiene relación con la tendencia en el incremento del desarrollo de tecnologías relacionadas con transformadores eléctricos. Por lo anterior, se considera que el mercado de los transformadores eléctricos es un mercado grande e importante dependiente de la necesidad de la sociedad a las mejoras en el suministro de la energía eléctrica.

Con respecto a la segmentación de mercado de equipos eléctricos, los generadores y conjuntos ocupan el 17% del mercado total con $34.3 billones de dólares reportados en 2011[2].

En esta área podríamos considerar a los transformadores eléctricos. Utilizando la tasa de crecimiento reportada en la tabla anterior podríamos hacer una proyección en billones de dólares que tendría solamente el área de generadores y conjuntos. Esta proyección se observa en la Tabla 3.

Año	$ billón
2011	34.3
2012	35.91
2013	37.60
2014	39.36
2015	41.21
2016	43.14

Tabla 3 Proyección del mercado global del área de generadores y conjuntos hasta 2016

Adicionalmente, la segmentación del mercado por áreas geográficas que se encontró para los aparatos eléctricos se muestra en la tabla siguiente. Como puede observarse, el área Asia-Pacifico es la que mayor porcentaje del mercado tiene, lo cual es consistente con el mercado territorial mencionado anteriormente ya que China y Japón son los mercados más importantes de acuerdo al análisis de documentos que se hizo en el estudio de inteligencia tecnológica.

CONFIDENCIAL

Geografía	2011	%
Asia-Pacífico	106.4	52.6%
Europa	46.7	23.1%
Américas	43.1	21.3%
Resto del Mundo	5.8	2.9%
Total		100%
		FUENTE: MARKETLINE

Tabla 4 Segmentación del mercado por área geográfica

Posteriormente Europa y America son las áreas geográficas con porcentaje del mercado significativo.

Es interesante notar que las tendencias encontradas en el mercado global de los equipos eléctricos son consistentes con la tendencia mostrada a partir del análisis de los documentos encontrados en donde en ambos casos se pronostica un incremento significativo en esta área tecnológica lo que da lugar a la creación de oportunidades para el desarrollo de tecnologías de este tipo.

3.5.2. Mercado de equipos eléctricos en México[3]

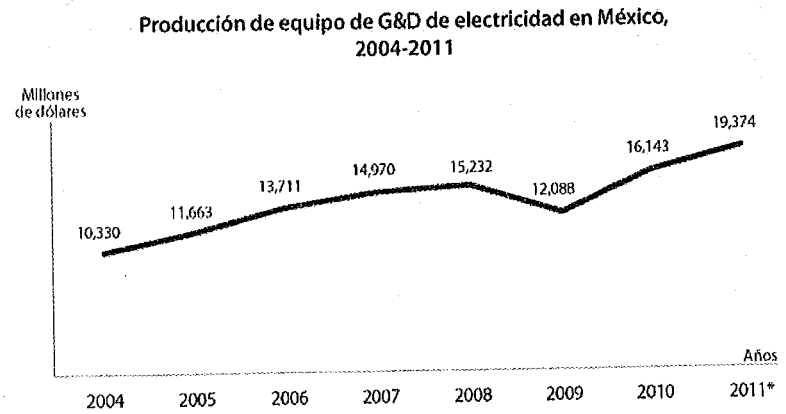
El sector de equipo de generación y distribución (G&D) de electricidad está conformado por dos segmentos: motores eléctricos y generadores, y equipo de distribución y control de electricidad. El primer segmento se refiere a los generadores de corriente directa y alterna, motores universales, convertidores rotativos, transformadores eléctricos y convertidores estáticos, entre otros. El segundo se refiere a los aparatos eléctricos para la conexión o protección de circuitos eléctricos, aparatos para corte, seccionamiento, cuadros, paneles, consolas, etc.

México es el principal productor de equipo de G&D de electricidad en Latinoamérica por lo que se ha posicionado como uno de los principales destinos de inversión en el sector. Además, México es el principal proveedor del mercado estadounidense en productos de distribución de energía, transformadores, en motores y generadores.

Esta industria se ha ido fortaleciendo a través de los años. En 2011, la producción total del sector alcanzó un monto de 19,374 millones de dólares, de los cuales 59.8% se concentró al segmento de equipo de distribución y control de energía eléctrica y el resto al de motores eléctricos y generadores. La Figura 16 muestra la tendencia en México de equipos de generación y distribución de electricidad en México.

CONFIDENCIAL

[3] Proméxico, perfil del sector, equipo de G&D de electricidad
http://mim.promexico.gob.mx/wb/mim/elec_perfil_del_sector



*Dato estimado.

Fuente: ProMéxico con datos del Sistema de Cuentas Nacionales, INEGI, y Global Insight, 2012.

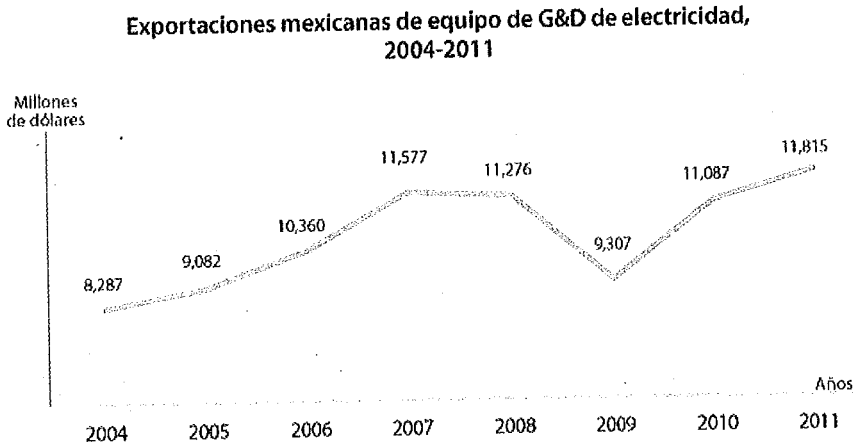
Figura 16 Tendencia de la producción de G&D de electricidad en México

Como puede observarse, la tendencia de producción en este sector ha ido aumentando a excepción del año 2009 pero en los últimos dos años ha crecido la producción de estos equipos.

Con respecto a las exportaciones del sector, el principal mercado de destino fue Estados Unidos, el resto se dirigió a países como Canadá, Países Bajos, China, entre otros.

Entre los productos más exportados se encuentran los motores y generadores, vatihorímetros, cables y transformadores.

La Figura 17 muestra la tendencia de exportaciones en México. Esta información nos muestra un panorama general del tamaño del mercado de los transformadores de distribución en donde se espera un incremento en producción, ventas y exportaciones en los próximos años de acuerdo a la tendencia observada.



Fuente: ProMéxico con datos de Global Insight, 2012.

Figura 17 Exportaciones mexicanas de equipos G&D de electricidad

Con respecto específicamente a los transformadores eléctricos, según datos del INEGI reportados en la publicación mensual de la estadística del comercio exterior en México las exportaciones reportadas en miles de pesos para 2011 fueron de $228,659 miles de dólares y en 2012 se estimaron en $255,131 miles de dólares. En el caso de las importaciones en 2011 fueron de $262,389 miles de pesos y en 2012 se estiman en $272,281 miles de pesos[4].

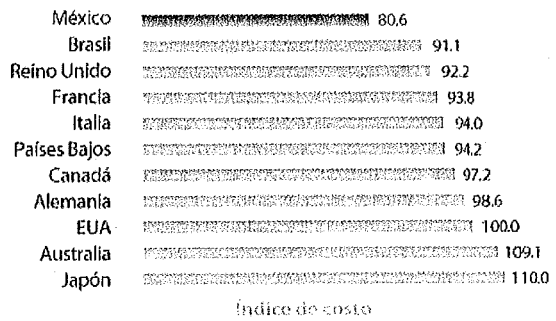
Calculando la balanza económica de los transformadores (Exportaciones – importaciones) se obtiene un valor para la balanza de $-33,730 miles de dólares en 2011 y estimado de -17,150 miles de pesos. Como se puede observar, en México al parecer se tiene un déficit en la demanda de transformadores eléctricos ya que se importa más de lo que se exporta. Lo anterior da lugar a la identificación de una oportunidad tecnológica para el desarrollo de tecnología de este tipo como ya se había observado a partir del análisis del total de documentos encontrados, para no solamente sustituir importaciones, sino dar valor agregado a través de la innovación tecnológica para modificar la balanza.

Como dato importante dentro del mercado Mexicano de equipos de generación y distribución de electricidad, de acuerdo con un estudio de KPMG, México destaca como el país con menores costos de operación de América, en procesos relacionados con la manufactura de equipo de generación y distribución de electricidad. En la Figura 18 podemos observar el comparativo de México con otros países con respecto a los costos de operación.

Adicionalmente, en México existen capacidades para proveer una serie de procesos que son utilizados en la industria de equipo de generación y distribución de electricidad, entre los que destacan: maquinado, fundición, extrusión, ensamblado, estampado, inyección de plástico, inyección de aluminio, forja, laminado, soldadura, pailería y tratamientos superficiales térmicos.

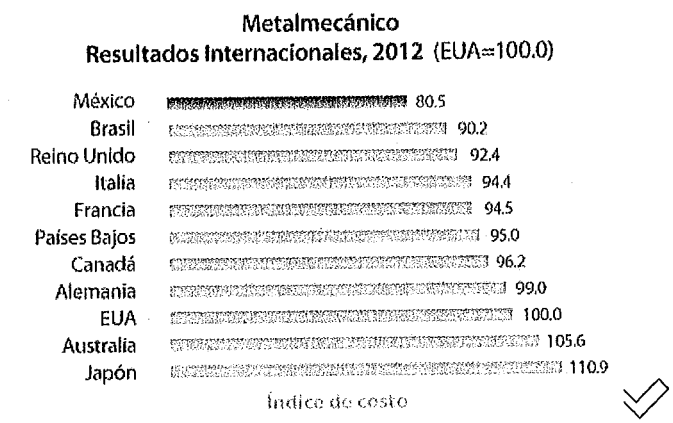
De acuerdo a lo anterior, México no es sólo un país de mercado importante en el sector eléctrico sino también un país clave para la manufactura de estos equipos por su bajo costo de operación y sus capacidades tecnológicas.

Manufactura de Productos Plásticos
Resultados Internacionales, 2012 (EUA=100.0)



Fuente: Competitive Alternatives,
KPMG's guide to international business location 2012 Edition.

[4] Estadísticas del comercio exterior en México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Enero-Agosto de 2012



Fuente: Competitive Alternatives,
KPMG's guide to international business location 2012 Edition.

Figura 18 Comparación de costos de manufactura en México

Como dato importante y con el objetivo de establecer un tamaño de mercado más específico para los transformadores de distribución, la siguiente tabla menciona el número de transformadores instalados por área en la zona metropolitana de la Ciudad de México hasta diciembre de 2006[5].

CONCEPTO	ZONA METROPOLITANA	DELEGACIONES	MUNICIPIOS CONURBADOS
SUBESTACIONES DE TRANSMISIÓN a/	19	8	11
POTENCIA DE SUBESTACIONES DE TRANSMISIÓN a/ (Megavolts-amperes)	8,980	3,810	5,170
SUBESTACIONES DE DISTRIBUCIÓN	95	49	46
POTENCIA DE SUBESTACIONES DE DISTRIBUCIÓN (Megavolts-amperes)	10,568	5,845	4,723
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN	72,876	41,002	31,874
POTENCIA DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN (Megavolts-amperes)	6,310	3,885	2,425
a/	Comprende subestaciones elevadoras y reductoras.		
FUENTE:	Luz y Fuerza del Centro. Gerencia de Comercialización; Subgerencia Comercial de Estudios Económicos.		

[5] Reporte INEGI industria hasta el 31 de Diciembre de 2006

	Luz y Fuerza del Centro. Gerencia de Comercialización; Subgerencia de Estudios Económicos.
	Comisión Federal de Electricidad. División Centro Sur.

En la actualidad el mercado de los transformadores de distribución es mayor de acuerdo a las tendencias de crecimiento encontradas durante el análisis de los datos.

Considerando la importancia que tiene esta región, es un indicador del mercado de transformadores, y sobre todo de la necesidad a futuro de cambio y mantenimiento de los transformadores instalados.

3.5.3. Competidores y/o aliados potenciales en México.

De acuerdo al último censo económico de INEGI, en México existen un total de 669 unidades económicas especializadas en la industria de generación y distribución de electricidad; además, el sector emplea a cerca de 126 mil personas.

Algunas de las principales empresas de la industria son ABB, Eaton, Furakawa, ACME, Belden, Cooper, General Electric Company, Hammond, Schneider, Siemens, Thomas and Betts, Mitsubishi, WEB, entre otras. Dichas empresas se encuentran ubicadas principalmente en el Distrito Federa, Nuevo León, Chihuahua, Estado de México y Jalisco.

Al respecto, es importante señalar que varias de éstas son las que aparecen en el análisis tecnológico como líderes en el tema de transformadores de alta eficiencia, como es el caso de ABB, GE (Prolec-GE) y Siemens, así como otras con menos tecnologías pero con desarrollos como Mitsubishi.

3.5.4. Clientes potenciales para la tecnología.

Los clientes potenciales para tecnologías relacionadas con transformadores de distribución de alta eficiencia energética y mayor seguridad son principalmente todas aquéllas instituciones gubernamentales que están encargadas del abasto de la energía eléctrica a la población.

En el caso particular de México la Comisión Federal de Electricidad es el cliente potencial principal ya que la CFE representa el 40% de las ventas nacionales. Adicionalmente, consideramos que una vez que en el país se desarrolle tecnología innovadora para desarrollar transformadores de distribución de alta eficiencia, el porcentaje que representa CFE debería incrementarse puesto que no habría necesidad de que se importe del extranjero esta tecnología.

De manera general, en lo concerniente a subestaciones y transformadores en México al cierre del 2009 se registró una capacidad instalada de 265,133 MVA[6], lo cual representa un incremento del 4.6% sobre el año anterior. De esta capacidad instalada 147,133 MVA le corresponden a subestaciones de transmisión y 87,050 MVA a subestaciones de distribución de CFE, mientras que subestaciones correspondientes a la extinta LFC permanecieron en 30,951 MVA.

Considerando la tabla del apartado anterior 3.5.4. y considerando un crecimiento anual del 4.7% podría estimarse aproximadamente el mercado de los transformadores de distribución en México para CFE.

[6] Prospectiva del sector eléctrico 2010-2025, Dirección General de planeación energética, Secretaría de Economía, año 2010

CONFIDENCIAL

CONCEPTO/AÑO	2006	2012	2013	2014	2015	2016	2017
ZONA METROPOLITANA	72,876	76,302	79,889	83,644	87,576	91,693	96,003
DELEGACIONES	41,002	42,930	44,948	47,061	49,273	51,589	54,014
MUNICIPIOS CONURBADOS	31,874	33,373	34,942	36,585	38,305	40,106	41,991
TOTAL DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN	145,752	152,605	159,779	167,290	175,154	183,388	192,008
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN NECESARIOS	0	6,853	7,174	7,511	7,864	8,234	8,620

Tabla 5 Mercado potencial estimado para los transformadores de distribución en México

De acuerdo al análisis de mercado realizado tanto desde el punto de vista de propiedad intelectual como el de mercado, se observa una tendencia de crecimiento para los próximos años en el mercado del sector eléctrico. Esto es consistente con el desarrollo de nuevas tecnologías en este sector en general y específicamente en tecnologías relacionadas con transformadores de distribución ya que se encuentra en mejora e innovación constante.

Por todo lo anterior, consideramos que en esta área tecnológica existen muchas oportunidades de desarrollo en tecnología y de mercado. De tal forma que sería interesante explotar estas oportunidades para mejorar la posición de propiedad intelectual de las empresas mexicanas frente a otras extranjeras ya que, como se encontró a partir del análisis, México es un país interesante por sus mercado y por sus capacidades tecnológicas y de manufactura lo que lo coloca en un blanco importante para otras empresas fuera del país.

3.6. Recomendaciones generales para la estrategia de protección de Propiedad Intelectual para nuevos desarrollos.

Las recomendaciones generales para lograr una estrategia de protección de propiedad intelectual que encontramos a partir del estudio de inteligencia tecnológica son:

- ✓ Definir las tecnologías que desde el punto de vista técnico son necesarias para el desarrollo de transformadores de distribución de alta eficiencia.
- ✓ Identificar si las mejores tecnologías son de libre uso en México, o bien, si existen posibilidades de colaboración con el titular de las patentes. Esto debe hacerse considerando que los documentos que tienen una fecha de prioridad anterior a Junio de 2010 ya no podrían presentarse en México.

CONFIDENCIAL

- ✓ En caso de que existan documentos detectados en el extranjero que resulten muy relevantes para el diseño de transformadores de alta eficiencia que cumplan con la norma, pero que tengan una fecha de prioridad posterior a Junio de 2010, será necesario establecer una vigilancia de presentación de estos documentos en México para verificar si finalmente fueron presentados o no conforme a los plazos que marcan los tratados internacionales.
- ✓ En caso de que las tecnologías más relevantes sean de los competidores más fuertes con presencia en el mercado en México, identificar las tecnologías que tecnológicamente permitan el cumplimiento de los niveles de eficiencia de la norma y que al mismo tiempo no infrinjan las patentes de tales competidores.
- ✓ Identificar oportunidades de colaboración en estrategias no intentadas o encontradas en los documentos detectados a la fecha para mejorar la competitividad de las empresas pequeñas y medianas en el mercado de transformadores.
- ✓ Negociar los derechos de propiedad intelectual que puedan derivarse de la colaboración entre las instituciones que desarrollen la tecnología. Considerar aportación de propiedad intelectual base y de aportación económica.
- ✓ Si se requiere desarrollar tecnología y una vez desarrollada, busca la protección de la misma en los países detectados con el mercado más importante y en México.

4. Conclusiones y/o recomendaciones.

Las conclusiones que se obtienen a partir del análisis realizado son:

1. La tecnología analizada se puede considerar en etapa de desarrollo puesto que aún no se observa un estancamiento en el ciclo de vida de la tecnología. Sin embargo, de acuerdo a la curva, el desarrollo en que se encuentra es avanzado puesto que hay un gran número de documentos que describen tecnologías relacionadas con el diseño y mejora de transformadores de voltaje.
2. No obstante a lo mencionado anteriormente, el área tecnológica de los transformadores necesita constantemente innovarse ofreciendo equipos mejorados y con mayores eficiencias por lo que existen áreas de oportunidad para el desarrollo de nuevas tecnologías relacionadas con transformadores de distribución o de mejoramiento de las tecnologías desarrolladas hasta el momento.
3. China, Estados Unidos y Japón son los países con el mayor número de tecnologías desarrolladas en esta área.
4. Los mercados de mayor interés son China, Estado Unidos, Japón, la comunidad Europea, Canadá, Korea, Alemania, Australia, Reino Unido, Taiwán, Austria, India y España. Estos países representan los mercados potenciales principales de tecnologías de este tipo.
5. ABB es el competidor principal en esta área ya que a lo largo del tiempo ha tenido una fuerte actividad y principalmente en los últimos 5 años ha desarrollado varias tecnologías. Esta empresa tiene y tendrá en los próximos años una posición fuerte tanto comercial como de de propiedad intelectual en el área, lo que lo convierte también en un aliado tecnológico potencial para el desarrollo de nuevas tecnologías y para el diseño de transformadores de distribución mejorados.
6. Existen otros titulares interesantes como: Grid Electric Power Research Institute, Korea Electric Power Corporation y Shanghai Zhixing Electric CO. LTD. que podrían convertirse en los próximos años en competidores y/o aliados tecnológicos importantes para el desarrollo de nuevos transformadores de distribución.
7. En México ABB y Prolec GE/General Electric son los titulares principales en tecnologías de este tipo. Square D Corporation y Cooper Industries parecen ser también competidores

CONFIDENCIAL

y/o aliados tecnológicos importantes para el desarrollo de tecnologías de transformadores de distribución.

8. No se encontraron documentos relevantes de centros de investigación, por lo que es necesario tener especial cuidado con las patentes para no infringir derechos de las empresas que se encuentran desarrollando tecnologías en esta área.
9. De acuerdo al análisis por característica realizado, se observa que las empresas e instituciones educativas en China están desarrollando un gran número de tecnologías relacionadas con transformadores de distribución por lo que valdría la pena evaluar la factibilidad de realizar una alianza tecnológica con estas instituciones que permita el desarrollo de tecnología innovadora que permita cubrir con los requisitos de la norma mexicana.
10. Los clientes potenciales para tecnologías relacionadas con transformadores de distribución de alta eficiencia energética y mayor seguridad son principalmente todas aquéllas instituciones gubernamentales que están encargadas del abasto de la energía eléctrica en la población. En el caso de México obviamente se trata de la CFE.
11. Se recomienda que una vez que se definan las tecnologías de interés para el desarrollo de transformadores de distribución de alta eficiencia, se realice un análisis de libertad de uso específico para la tecnología para evitar la infracción de derechos de terceros.
12. De acuerdo al análisis de mercado realizado tanto desde el punto de vista de propiedad intelectual como el de mercado, se observa una tendencia de crecimiento para los próximos años en el mercado del sector eléctrico. Esto es consistente con el desarrollo de nuevas tecnologías en este sector en general y específicamente en tecnologías relacionadas con transformadores de distribución ya que se encuentra en mejora e innovación constante.
13. Consideramos que en el sector eléctrico existen muchas oportunidades de desarrollo en tecnología y de mercado ya que, como se encontró a partir del análisis, México es un país interesante por su mercado y por sus capacidades tecnológicas y de manufactura lo que lo coloca en un blanco importante para otras empresas fuera del país pero también como un gran mercado para el desarrollo de proveedores especializados internamente que puedan ser competitivos a nivel internacional.
14. Con respecto a los requerimientos de la norma mexicana NOM-002-SENE-2010 se encontraron varios documentos que describían tecnologías que pudieran ser utilizadas para cumplir con los requisitos de seguridad y de eficiencia mencionados en la norma por lo que se recomienda analizar estos documentos para evaluar si pueden ser implementados en México en caso de que sean de libre uso.

CONFIDENCIAL

5. Anexos.

Anexo A. Documentos equivalentes encontrados en México de la búsqueda general realizada.

Anexo B. Documentos relacionados con transformadores de distribución en México, encontrados a partir de la búsqueda adicional realizada.

Anexo C. Documentos relacionados con transformadores de distribución que no fueron clasificados en ninguna categoría de acuerdo al análisis realizado.

Anexo D. Documentos relacionados con transformadores de distribución de tipo pedestal.

Anexo E. Documentos relacionados con transformadores de distribución de tipo poste.

Anexo F. Documentos relacionados con transformadores de distribución en subestación.

Anexo G. Documentos relacionados con transformadores de distribución sumergibles.

Anexo H. Documentos relacionados con transformadores de distribución de alta o mejorada eficiencia.

Anexo I. Documentos relacionados con transformadores de distribución que evitan o disminuyen la pérdida de calor, de vacío, de hierro y de cobre (del núcleo).

Anexo J. Documentos relacionados con transformadores de distribución que evitan o disminuyen la pérdida magnética.

Anexo K. Documentos relacionados con transformadores de distribución herméticos o sellados.

Anexo L. Documentos relacionados con transformadores de distribución que evita o disminuyen los cortocircuitos.

Anexo M. Documentos relacionados redes eléctricas de transformadores de distribución.

CONFIDENCIAL

CANAME

SE
SECRETARÍA DE ECONOMÍA

Solicitud de Apoyo Programa para el Desarrollo de las Industrias de Alta Tecnología (PRODIAT)

IV. Diseño del Prototipo de Transformador de distribución, con base en los nuevos estándares de la NOM-002-SEDE-Transformadores de Distribución

CANAME

SE

SECRETARÍA
DE ECONOMÍA

Solicitud de Apoyo Programa para el Desarrollo de las Industrias de Alta Tecnología (PRODIAT)

DISEÑO 1

DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN DE ALTA EFICIENCIA CON BASE EN LA NOM-002-SEDE-TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

METODOLOGÍA DEL DISEÑO DEL TRANSFORMADOR

Dos materiales magnéticos diferentes (M3 y acero amorfo: Metglass 2605SA1) con diferentes espesores se consideran para seleccionar la opción que cumple con las nuevas eficiencias de la NOM-002. Los diseños de transformadores son comparados con base en el costo evaluado del transformador. El impacto de los diferentes materiales magnéticos en el costo evaluado se calcula para un transformador monofásico de 25 kVA

Los transformadores cumplen con las restricciones de construcción y de las normas mexicanas vigentes. El documento considera el impacto del factor de espacio en pérdidas en el núcleo y del factor de destrucción. Se concluye que para la capacidad analizada, la laminación M3 es la mejor opción. Este documento proporciona directrices para seleccionar el material magnético adecuado para transformadores de distribución. Los transformadores que se consideran en este reporte son tipo acorzado con núcleo enrollado.

Debido a la importancia de mejorar el rendimiento de núcleo eléctrico, los investigadores están muy activos en el desarrollo de mejores núcleos de los transformadores [5.1] - [5.8]. Mejores técnicas de fabricación se han desarrollado como consecuencia de una mejor comprensión de los factores que influyen en las propiedades magnéticas. Hoy en día, la calidad de los aceros eléctricos se ha mejorado sustancialmente. Factores que impactan las pérdidas del núcleo se presentan en [5.9] - [5.10]: (a) la calidad del aislamiento de la laminación, (b) el porcentaje de silicio en la aleación, (c) las impurezas químicas, (d) el tamaño de grano, (e) control de la orientación cristalina, y (f) el espesor de núcleo de laminación.

En general, las mejoras en los materiales del núcleo y procesos de fabricación tienen un impacto significativo en el coste del transformador. Cuando el material magnético mejora, el tamaño del núcleo puede ser reducido. El uso de un mejor material con la zona de entrehierros mejorada permite una mayor densidad de flujo. Sin embargo, el costo de producción por unidad de peso de aceros eléctricos aumenta rápidamente a medida que se reduce espesor de laminación. Mientras que los materiales más delgados pueden ser necesarios para ciertas aplicaciones, el uso de laminaciones más delgadas de lo necesario es un desperdicio.

Los precios de transformadores suelen compararse en términos del costo evaluado (CE) y el precio de compra (también llamado precio de oferta). El CE de un transformador es la suma del precio de compra más el costo de las pérdidas del transformador a lo largo de la vida del mismo [5.11]. Las compañías eléctricas suelen comprar transformadores basadas en CE, es decir, seleccionar la oferta que minimice el CE. Por otra parte, los usuarios industriales suelen comprar transformadores basados en el precio de compra del transformador, es decir, seleccionar la oferta con el precio mínimo de compra. En consecuencia, los fabricantes de transformadores minimizan el CE o el precio de venta en función del tipo de cliente.

El término "aceros eléctricos" ha sido universalmente aceptado como la designación de los materiales magnéticos laminados rolados en los que el silicio es un elemento de aleación importante [5.12]. La designación de la American Iron and Steel Institute (AISI) para los grados de acero eléctrico consisten en la letra M (material magnético) seguido de un número (por ejemplo, M3) para especificar el tipo de laminación. En el momento en que el sistema AISI fue aprobada, el número asignado a cada tipo de grado fue de aproximadamente diez veces las pérdidas en el núcleo, expresada en watt por libra para un espesor dado. Los números que acompañan a la letra M en la actualidad no tiene el mismo significado.

Por otro lado, a principios de 1960, los metales con cristales en estado amorfo fueron producidos por primera vez. Los metales amorfos son un tipo de material relativamente nuevo que no tiene una estructura cristalina como los metales comunes, y puesto que su estructura es más bien parecida a la del vidrio son llamados "vidrios metálicos". Los metales amorfos se forman mediante una solidificación rápida donde el metal derretido es super-enfriado en segundos, lo que provoca que los átomos se acomoden de manera arbitraria [5.1]. Este material, a pesar de ser muy delgado, tiene una gran dureza y resistencia física, tiene propiedades magnéticas que lo hacen fácilmente magnetizable y desmagnetizable. Los primeros transformadores que se hicieron experimentalmente con núcleos de metal amorfo presentaron una gran reducción de pérdidas en el núcleo.

Para iniciar el análisis, es importante conocer las pérdidas por unidad de peso de los materiales magnéticos considerados: M3 y acero amorfo. De acuerdo con [5.13] a 60 Hz los watts por kilogramo de estas laminaciones se puede modelar como una función de densidad de flujo magnético B.

$$w_{kg}^{\mathrm{M3}} = -45.94322511 + 17.94316167 \cdot B - 2.787213965 \cdot B^2 + 0.21646225 \cdot B^3 - 0.008382569 \cdot B^4 + 0.000129908 \cdot B^5 \qquad (2)$$

$$w_{kg}^{amorfo} = 0.0003B^3 - 0.006B^2 + 0.0715B - 0.2288 \qquad (5)$$

Las funciones dadas por (1) y (2) se pueden observar en la figura 5.1. De la misma manera las pérdidas aparentes para M3 y el acero amorfo se muestran en la figura 5.2.

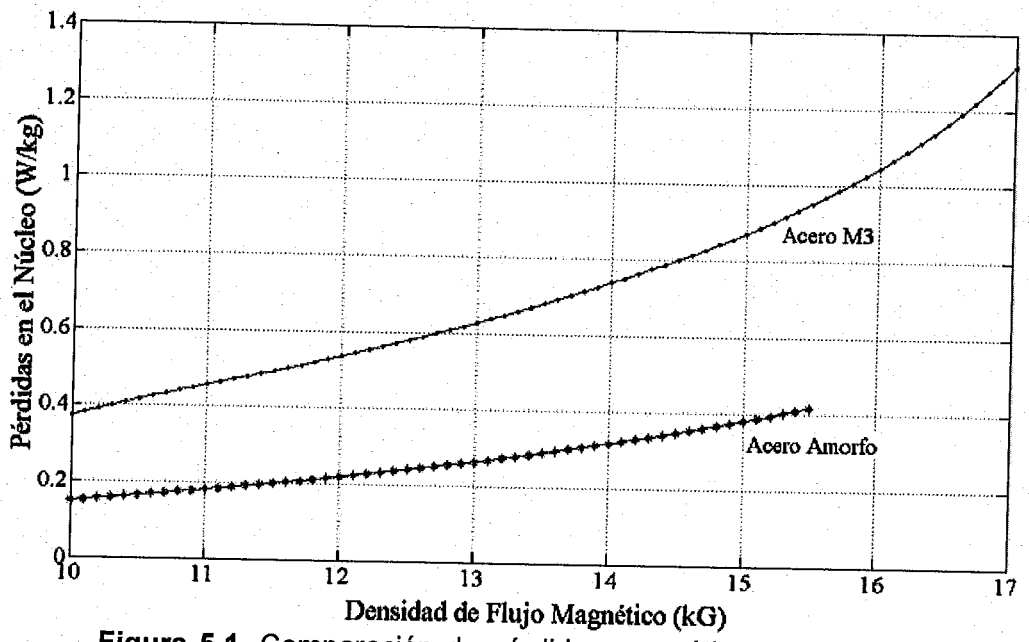


Figura 5.1. Comparación de pérdidas magnéticas en núcleos de metal amorfo y de acero M3 en W/kg para diferentes valores de densidad de flujo.

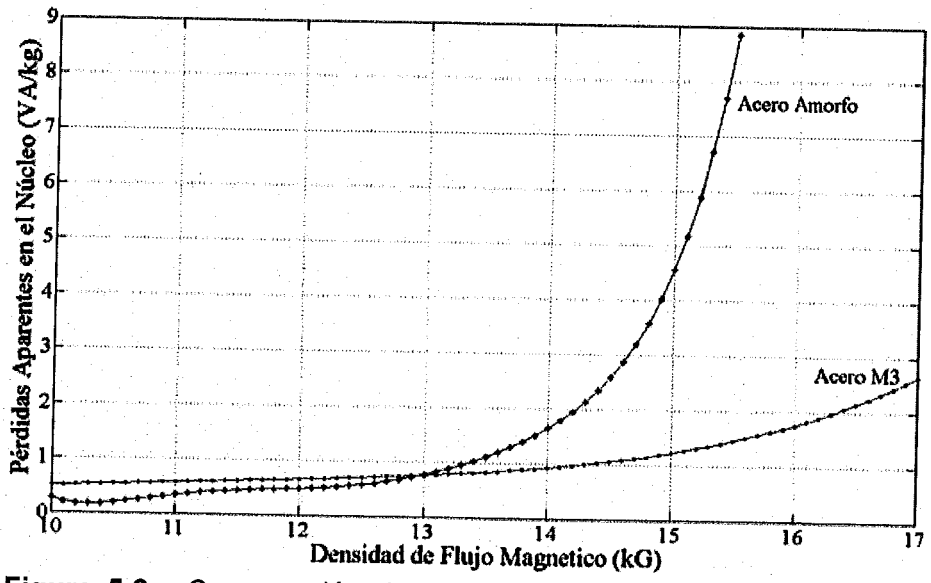


Figura 5.2. –Comparación de pérdidas aparentes de un transformador con núcleo de metal amorfo y de acero M3.

El factor de espacio o factor de laminación es la medida de la compactación de un núcleo de acero eléctrico. Esto también se conoce como factor de apilamiento. Factor de espacio es la relación entre el equivalente "sólido" de volumen, calculado a partir del peso y la densidad del acero, al volumen real del paquete comprimido. La figura 5.3 ilustra cómo el factor de espacio varía como una función de la presión para las diferentes laminaciones. La presión de compresión de las laminaciones no debe exceder un límite máximo de 1.0 MPa para evitar la reducción excesiva de la resistividad del aislamiento de la laminación [5.14].

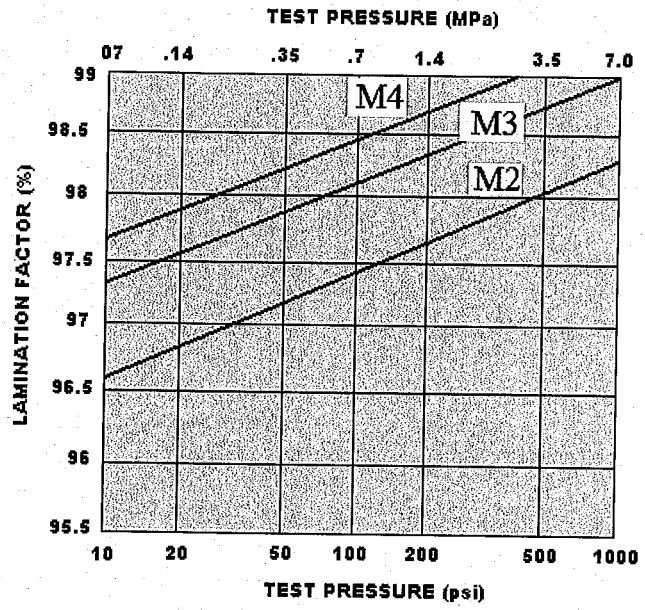


Figura 5.3. Lamination factor versus test pressure for the most widely used forms of grain oriented silicon steel produced by AK Steel Corporation Factor Laminación contra la presión de prueba para los aceros al silicio de grano orientado producido por AK Steel.

Si una presión típica de ensamble del núcleo de 20 psi (0,14 MPa) se considera, como la obtenida con máquinas flejadoras manuales, los factores de espacio para M2, M3 y M4 resultan de 96.8%, 97.6%, y 97.8%, respectivamente (Figura 3) [5.12]. Aunque el factor de espacio del acero amorfo es menor, el factor de espacio varía de 0.75 a 0.85 [5.10]. Para esta investigación se manejo un factor de espacio igual a 0.85, se selecciona este valor porque es lo que recomendó el fabricante del material amorfo.

Hay factores que se consideran como posibles causas del aumento de las pérdidas de núcleo: a) Manejo inadecuada del núcleo de acero durante la fabricación del transformador, b) recubrimiento aislante pobre de las capas de laminación, c) las disposiciones inadecuadas de las la zona de entrehierros, d) formando de rebabas en los bordes de la lamina o en los cortes que se hacen para formar los entrehierros (si están presentes rebabas en la laminación, los cortocircuitos entre laminación pueden presentarse), e) el horneado incompleto para el alivio de los esfuerzos mecánicos. Las pérdidas adicionales debido a todos estos factores se toman en cuenta mediante la inclusión de un factor de destrucción. El factor de destrucción es la relación de las pérdidas de del núcleo medidas por peso (W / kg) para un núcleo totalmente ensamblado, a las pérdidas del fabricante especificadas (W / kg) para el material magnético considerado. El factor de construcción utilizado en el software, es 1.07.

Los diseños con las dos laminaciones diferentes consideradas (M3 y acero amorfo) tienen que cumplir con todas las restricciones de fabricación y con las restricciones de la norma que se aplique: las pérdidas sin carga máximas, pérdidas totales máximas, la eficiencia, el valor mínimo y máximo de impedancia y límite máximo de la corriente de excitación. La figura 5.4 muestra el diagrama de flujo del programa utilizado para minimizar una función objetivo, tal como el CE. El programa implementado para el diseño óptimo de transformadores monofásicos de distribución tipo acorazado utiliza las expresiones (1) y (2), e incluye el factor de espacio y el factor de destrucción mencionados previamente para obtener las dimensiones del núcleo, el peso del núcleo y las pérdidas sin carga basado en el algoritmo descrito en la figura 5.4.

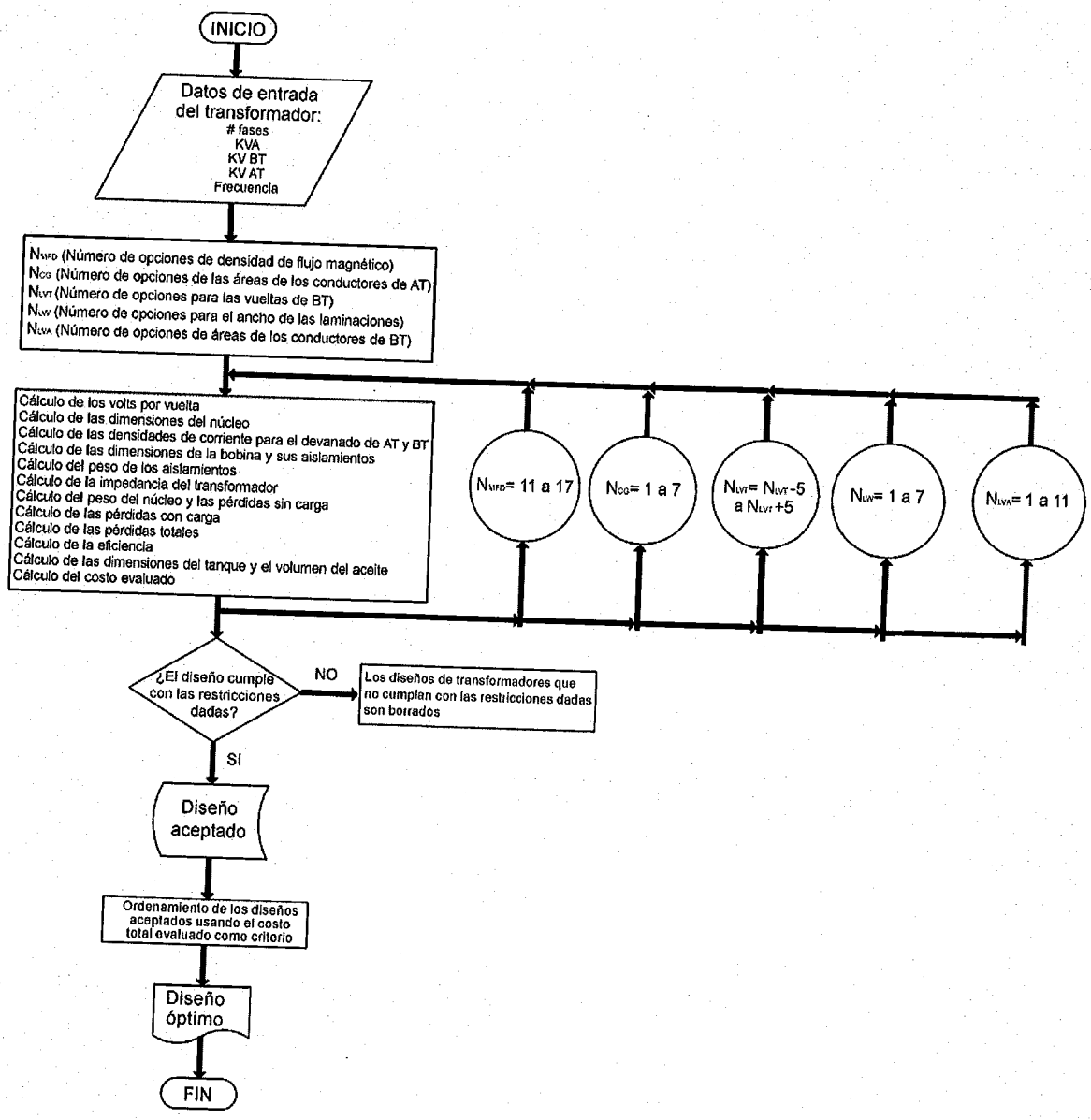


Figura 5.4. Diagrama de flujo del programa implementado para diseñar transformadores

La metodología del programa de diseño de transformadores desarrollada en este trabajo cumple cabalmente con las normas correspondientes y las especificaciones del cliente. La ventaja de este programa es que es de fácil implementación para las pequeñas y medianas empresas fabricantes de transformadores.

El programa se utilizó para diseñar transformadores, cuyas características se presentan a continuación: Capacidades: 5-50kVA, Tensión en alta: 13.2-33kV, Tensión en baja: 240/127V, Fases: monofásico, Frecuencia: 60Hz, Material Magnético del Núcleo: Acero al silicio de grano orientado laminado grado M3 y Acero amorfo grado 2605SA1, Refrigeración: OA (sumergido en aceite, con enfriamiento natural), Materiales del devanado de alta tensión: Alambre magneto de aluminio, Materiales del devanado de baja tensión: Cinta o lámina de aluminio.

Los costos de los materiales utilizados en el diseño están dados en por unidad en términos de un precio base de $75/kg: Acero amorfo 1pu, Aluminio 0.53pu, Acero al silicio 0.39pu, Aceite 0.062 pu, Aislamiento 0.543pu, Acero al carbón para el tanque 0.4pu.

El programa tiene como datos de entrada las especificaciones del transformador: capacidad del transformador (kVA), número de fases, voltajes, elevación de temperatura, frecuencia, conexión de los devanados y valores de garantía (porciento de corriente de excitación, porciento de impedancia, pérdidas en el núcleo, pérdidas totales y eficiencia). Los valores de garantía se obtienen de la base de datos con las que cuenta el programa desarrollado. El programa ha sido validado experimentalmente y su tiempo de ejecución es de 268 segundos. El diseño de los transformadores se lleva a cabo en tres etapas: 1) Circuito Magnético, 2) Circuito Eléctrico y 3) Diseño Mecánico.

El programa obtiene el diseño del transformador utilizando como función objetivo el costo evaluado. El costo evaluado toma en cuenta no sólo el precio inicial del transformador sino también el costo de operación y mantenimiento durante la vida útil del transformador. El costo evaluado (CE) se define de la siguiente manera [5.6]:

$$CE = CMT + A \cdot PSC + B \cdot PCC \tag{5.1}$$

Donde: CMT es el costo de materiales del transformador (en pesos mexicanos), A el costo de las pérdidas en vacío del transformador ($89.90/W), B el costo de las pérdidas con carga del transformador ($44.28/W) [5.15], PSC las pérdidas sin carga (W) y PCC las pérdidas con carga (W).

El programa de diseño tiene las siguientes variables de iteración: Vueltas del embobinado de baja tensión, calibres de conductores de alta tensión y baja tensión, densidades de flujo magnético y anchos de láminas. Se utilizan 11 calibres de alambre magneto para alta tensión, 7 diferentes cintas de aluminio para el devanado de baja tensión y 4 diferentes anchos de lámina del núcleo. Para el diseño de los transformadores con núcleo de material amorfo la densidad de flujo magnético inicia en 11kG y se incrementa en 0.1 hasta llegar a 15kG y se asume un factor de espacio de 0.85 (descrito más adelante). Para el diseño con núcleo de acero al silicio la densidad de flujo magnético inicia en 15kG

y se incrementa en 0.1 hasta llegar a 17kG y el factor de espacio se toma de 0.97. Por falta de espacio no se dan más detalles del algoritmo del programa de diseño, pero los lectores interesados pueden obtener más detalles sobre el funcionamiento del programa utilizado en [5.16].

RESTRICCIONES DE DISEÑO DEL TRANSFORMADOR

Las restricciones de diseño del transformador se utilizan para determinar la región de diseño de factibilidad donde los parámetros de diseño óptimo del transformador pueden ser determinados. Las siguientes son las restricciones que se incluyen en el método de optimización del diseño.

A. Eficiencia

Las eficiencias mínimas en comparación contra la capacidad del transformador y tomando en cuenta también la clase de aislamiento de los transformadores monofásicos se puede ver en la figura 5.5, lo cual se ha tomado de la norma mexicana [5.17].

La eficiencia se calcula

$$\eta = \frac{C}{P_{Dev} + P_{fe} + C} 100\ \% \qquad (5.2)$$

donde :

□ = Eficiencia

C=Capacidad nominal del transformador en kVA

P_{fe}= Pérdidas máximas en el núcleo a tensión nominal en kW

P_{dev}=Pérdidas máximas en los devanados a capacidad nominal kW a 85°C ó 75°C

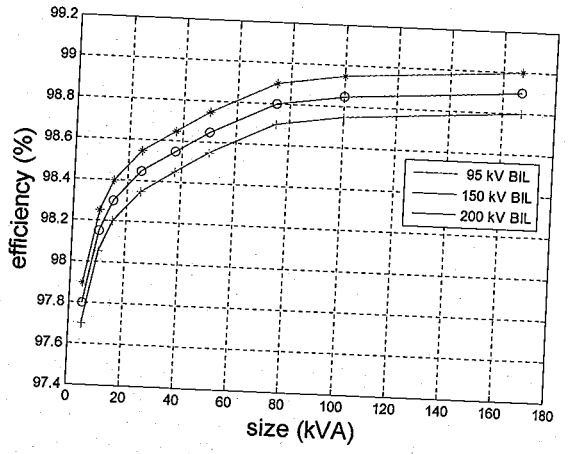


Fig. 5.5 Eficiencias mínimas exigidas por la norma mexicana para transformador monofásico [5.17].

B. Corriente de excitación

De acuerdo con [5.17], la corriente de excitación no debe exceder de 1.5% para transformadores monofásicos y trifásicos con capacidad superior a 45 kVA. Para transformadores trifásicos de hasta 45 kVA la corriente de excitación no debe ser mayor de 2.0%.

C. Pérdidas sin carga y pérdidas totales

La Tabla 5.1 muestra las pérdidas sin carga y las pérdidas totales para los transformadores de distribución monofásicos.

Tabla 5.1. Pérdidas sin carga máximas (W) y pérdidas totales máximas (W) para transformadores monofásicos [5.17].

kVA	Nivel básico de aislamiento					
	95 kV		150 kV		200 kV	
	Pérdidas sin carga (W)	Pérdidas totales (W)	Pérdidas sin carga (W)	Pérdidas totales (W)	Pérdidas sin carga (W)	Pérdidas totales (W)
5	30	107	38	112	63	118
10	47	178	57	188	83	199
15	62	244	75	259	115	275
25	86	368	100	394	145	419
37.5	114	513	130	552	185	590
50	138	633	160	684	210	736

D. Impedancia

La tabla 5.2 muestra las restricciones de impedancia para transformadores de distribución monofásicos. La impedancia depende de la clase de aislamiento y de la capacidad del transformador.

Tabla 5.2. Restricciones de impedancia para transformadores monofásicos de 5 kVA a 167 kVA [5.17].

Clase de aislamiento (kV)	Impedancia (%)
1.2 to 25	1.5 a 3.00
25	1.50 a 3.25
34.5	1.50 a 3.50

Las eficiencias en transformadores de distribución están en fase de transición y los fabricantes se están preparando para ofrecer transformadores con las nuevas eficiencias y niveles de pérdidas como se muestra en la tabla 5.3 y 5.4 (tomadas de [5.18]). En las tablas 5.3 y 5.4 sólo se han considerado el caso monofásico.

Para la determinación de la eficiencia se deben considerar las pérdidas en vacío y debidas a la carga referidas a un factor de carga del 80% derivada de la medición de las pérdidas al 100% de la carga y corregida (a 85 ° C) y un factor de potencia unitario de acuerdo a [5.18]:

$$\%E = \frac{100(P \cdot kVA \cdot 1000)}{P \cdot kVA \cdot 1000 + NL + LL \cdot P^2 \cdot T} \tag{5.4}$$

Donde:
P = Carga por unidad (0,8)
kVA = kVA (nominal)
NL = Pérdidas en vacío a temperatura ambiente W
LL = Pérdidas debidas a la carga a temperatura de referencia (a 85°C) W
T = Factor de corrección para las pérdidas de carga a 70 °C (0.952332)

La diferencia entre (5.2) y (5.4) son el factores P y T. Otra diferencia importante es que ahora NOM-002-SEDE/ENER-2012 solo indica valores de pérdidas totales y no indica valores de pérdidas sin carga. En general hay un incremento en la eficiencia que se exige para los transformadores, por ejemplo para un transformador de 25 kVA de clase 15 kV, la eficiencia que se solicitará de acuerdo a la NOM-002-SEDE/ENER-2012 es de 98.90% y anteriormente con la NOM-002-SEDE-1999 era de 98.55 [5.19]. Para este mismo transformador, las pérdidas totales con la NOM-002-SEDE/ENER-2012 serán de 222 W y con la NOM-002-SEDE-1999 eran de 86 W sin carga y de 368 las totales. Con estos cambies existe la posibilidad de que resulte el CE más bajo fabricándolo con acero amorfo que con acero al silicio tradicional. Cada fabricante debe analizar y

CANAME

SE
SECRETARÍA DE ECONOMÍA

Tabla 5.3. Eficiencias mínimas permitidas referidas a un factor de carga del 80 % para los transformadores de distribución monofásicos (Eficiencia en %)

TIPO DE ALIMENTACION	CAPACIDAD EN kVA	NIVEL BASICO DE AISLAMIENTO		
		Hasta 95 (clase 15 kV)	Hasta 150 (Clase 18 y 25 kV)	Hasta 200 (clase 34,5 kV)
Monofásico	10	98,61%	98,49%	98,28%
	15	98,75%	98,63%	98,43%
	25	98,90%	98,79%	98,63%
	37,5	98,99%	98,90%	98,75%
	50	99,08%	98,99%	98,86%
	75	99,21%	99,12%	99,00%
	100	99,26%	99,16%	99,06%
	167	99,30%	99,21%	99,13%

Tabla 5.4. Pérdidas totales máximas permitidas referidas a un factor de carga del 80 % (Unidades en W)

Tipo de Alimentación	Capacidad kVA	Nivel básico de aislamiento al impulso kV		
		hasta 95	Hasta 150	hasta 200
		Totales	Totales	Totales
MONOFÁSICO	10	113	123	140
	15	152	167	191
	25	222	245	278
	37,5	306	334	380
	50	371	408	461
	75	478	533	606
	100	596	678	759
	167	942	1064	1173

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvieron diseños de transformadores para las capacidades de 5 a 50kVA, utilizando como función objetivo el costo evaluado. Esto se aplicó tanto para el transformador de metal amorfo como para el acero al silicio M3. El precio del acero al silicio M3 se mantuvo en $50/kg. Los resultados para el metal amorfo se obtuvieron para 2 costos diferentes: $75/kg y $100/kg. Las simulaciones correspondientes se muestran en las figuras 5.6 y 5.7. En la figura 5.6 se muestran los costos evaluados con el precios de $75/kg; se puede comprobar que el costo evaluado en transformadores de metal amorfo es menor en un 7.9% que en los transformadores de acero al silicio. En la figura 5.7 se muestra que el costo evaluado de los transformadores de acero amorfo con un precio de $100/kg es mayor en un 12% que para los transformadores de acero al silicio M3. En la figura 5.8 se muestran las pérdidas sin carga contra capacidades de transformadores con núcleo de metal amorfo y acero al silicio, se observa que el transformador con núcleo de acero amorfo tiene menores pérdidas en un 40% que en los transformadores de acero al silicio.

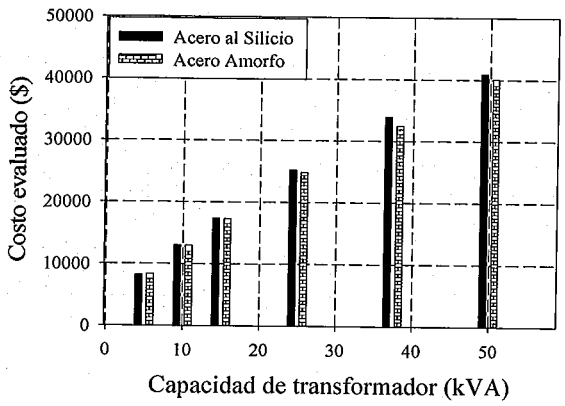


Figura 5.6. Costos evaluados de transformadores monofásicos y Capacidades. Los costos considerados del acero al silicio y metal amorfo son $50 pesos/kg y $60 pesos/kg, $75 pesos/kg respectivamente.

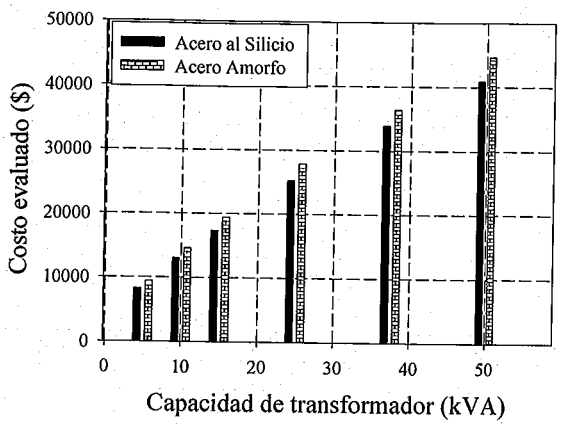


Figura 5.7. Costos evaluados de transformadores monofásicos y Capacidades. Los costos de considerados del acero al Silicio y metal amorfo son $50 pesos/kg y $100 pesos/kg respectivamente.

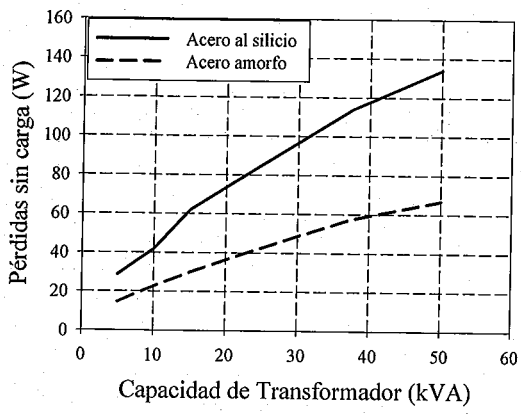


Figura 5.8. Pérdidas sin carga para transformadores con núcleo de acero amorfo y acero al silicio.

CONCLUSIONES

Este capítulo ha presentado una comparación de costos evaluados en transformadores de distribución con núcleos construidos con dos diferentes metales: metal amorfo y acero al silicio M3 (acero convencional), con el objetivo de observar cual diseño presenta el menor costo evaluado y que cumpliera con las restricciones impuestas por la norma.

En todas las simulaciones se cumplieron con restricciones impuestas por la norma (corriente de excitación, pérdidas en el núcleo, pérdidas totales, eficiencia e impedancia). Para las capacidades preferentes analizadas de 5 a 50 kVA, resulta que los transformadores con material amorfo presentan menores costos evaluados cuando el costo del acero amorfo es $75/kg. Cuando el costo del acero amorfo es de $100/kg, los costos evaluados de los transformadores son mayores que utilizando el acero convencional.

Es recomendado realizar los mismos ejercicios aplicando NOM-002-SEDE/ENER-2012.

CANAME

SE SECRETARÍA DE ECONOMÍA

REFERENCIAS

- Córcoles F, Sáinz L, Pedra J, Sánchez-Navarro J, Salichs M, (2008) Three-phase transformer modelling for unbalanced conditions. Part 1: Core modelling and introductory examples, IET Electric Power Applications, 2: 99-112.
- Guerra FCF, Mota WS (2007) Magnetic core model, IET Science, Measurement & Technology, 1: 145-151.
- Zirka SE, Moroz YI, Marketos P, Moses AJ, (2008) Comparison of engineering methods of loss prediction in thin ferromagnetic laminations, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 320:2504–2508.
- Zirka SE, Moroz YI, Marketos P, Moses AJ, Jiles DC, and Matsuo T (2008) Generalization of the Classical Method for Calculating Dynamic Hysteresis Loops in Grain-Oriented Electrical Steels, IEEE Transactions on Magnetics, 44:2113-2126.
- Theocharis AD, Milias-Argitis J, Zacharias Th (2008) Single-phase transformer model including magnetic hysteresis and eddy currents, Electr Eng., 90:229–241.
- Schulz R, Alexandrov N, Tdtreault J, Simoneau R, Roberge R (1995) Development and Application of Amorphous Core-Distribution Transformers in Québec, Journal of Materials Engineering and Performance, 4:430-434.
- Thompson JE (1967) A Review of Some Interdisciplinary Work on Grain-Oriented Silicon-Iron and its Use in Large Power Transformers, Journal of Materials Science, 2: 395-403.
- Kefalas TD, Georgilakis PS, Kladas AG, Souflaris AT, Paparigas DG (2008) Multiple grade lamination wound core: A novel technique for transformer iron loss minimization using simulated annealing with restarts and an anisotropy model, IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44:1082-1085.
- Moses AJ (1990) Electrical steels: past, present and future developments, IEE Proc. A, 1990, 137:233-245
- Littmann M (1971) Iron and silicon-iron alloys, IEEE Transactions on Magnetics, 7: 48-60.
- Alonso AM, Germain JG, Burgos JC, García B, Pérez E, Saenz de Buruaga MJ, de Pablo A (2000) Contribution to life expenditure evaluation of transformers paper-oil insulation under combined thermal and surge overvoltages stresses, 1st

International Conference on Insulation Condition Monitoring of Electrical Plant, Bujan, China.

- AK Steel Corporation: Selection of electrical steels for magnetic cores, AK Steel Corporation, 2000.
- Allegheny Ludlum Corporation (1996) Technical Data Silectron, Grain-Oriented Silicon Steel," Allegheny Ludlum Corporation, USA.
- Karsai S, Kerényi D, Kiss L (1987) Large power transformers, Elsevier, Budapest.
- Arce-Salas JJ, (2004) Factors for transformers evaluation, Comisión Federal de Electricidad, Subdirección de Distribución, Circular 31.312.02, http://desarrollo.azc.uam.mx/curso/tesis/Factores_de_evaluacion.pdf, accessed Feb 2010.
- J. C. Olivares-Galvan, P. S. Georgilakis R. Escarela-Perez and E. Campero-Littlewood, "Optimal design of single-phase shell-type distribution transformers based on a multiple design method validated by measurements", Electrical Engineering (Archiv für Elektrotechnik Springer), Vol. 93, No. 4, pp. 237-246,2011.
- Norma Mexicana ANCE, NMX-J-116 ANCE-2005. Transformadores de distribución tipo poste y tipo subestación, Especificaciones, pp. 7, 29-31.
- Anteproyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEDE/ENER-2012, Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución.
- Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEDE-1999, Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución.

ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LOS TRANSFORMADORES

NOCIONES HISTÓRICAS SOBRE EL TRANSFORMADOR

El primer transformador fue construido por **M. Faraday** (1831) cuando realizó los experimentos en los que descubrió la inducción electromagnética. El aparato que usó consistió en dos bobinas enrolladas una encima de la otra. Faraday no puso mayor atención en este aparato, ya que estaba interesado en otras cosas.

Fue hasta 1878, cuando el científico ruso **P. N. Yablochkov** construyó la primera planta comercial para la alimentación de un nuevo tipo de lámparas eléctricas inventadas por él conocidas como bujías Yablochkov. Para esta nueva central de energía, Yablochkov creó en cooperación con los talleres Gramme Engineering Works de Francia un generador síncrono y para mejorar el trabajo de la instalación, fabricó un transformador que tenía un circuito magnético abierto. Aunque fue impugnada la originalidad de este invento, las patentes concedidas a Yablochkov en 1876 y 1877 aunadas a la evidencia del relato sobre la iluminación en la Exposición mundial de París y el informe publicado por la Compañía Francesa de Iluminación Eléctrica, no deja lugar a dudas de que Yablochkov fue el primero que lo utilizó en una planta industrial comercial.

Lucien H. Gaulard, inventor francés y **John D. Gibbs**, ingeniero inglés, obtuvieron en 1882 una patente para un dispositivo que llamaron generador secundario. El sistema que ellos patentaron fue una versión poco práctica de lo que actualmente llamamos un transformador. Demostraron su sistema en Inglaterra en 1883 y en Italia en 1884.

Entre los visitantes a sus exposiciones estuvieron tres húngaros : **Otto T. Bláthy, Max Déri y Karl Zipernowski**. Ellos mejoraron el diseño del transformador y en 1885 presentaron en la exposición Nacional Húngara (en Budapest), lo que resultó ser prototipo del sistema de iluminación que se utiliza en la actualidad. Sus sistema tenía 75 transformadores conectados en paralelo que alimentaban 1067 lámparas incandescentes

del tipo Edison. El sistema era alimentado por un generador de ca de 1350 volts. La construcción de los transformadores era laboriosa y cara. Otto T. Bláthy fue el primero en usar la palabra transformador.

George Westinghouse (industrial norteamericano) presenció la demostración de Gaulard y Gibbs en Italia y conocía el sistema construido por Edison en Nueva York, del cual no era simpatizante, ya que estaba consciente de sus desventajas[1]. En 1884 Westinghouse contrató a **William Stanley** (joven ingeniero eléctrico). En 1885 Stanley ya había diseñado varios tipos de transformadores superiores a los de los húngaros. Stanley construyó con la ayuda de otros científicos, transformadores con laminillas de hierro, las cuales disminuían las pérdidas de energía. En 1886 entró en operación una planta construida bajo la dirección de Stanley en el pueblo de Great Barrington , Massachussetts. Esta planta operó con ca, con un generador de 500 volts y alimentó un conjunto de lámparas a una distancia de 2 km. Utilizando transformadores redujeron el voltaje a 100 V, que es el valor que se requiere para hacer funcionar las lámparas. De esta manera Westinghouse inició la manufactura y venta de equipos para distribuir electricidad de ca.

En 1891 en ingeniero **Braun** (director de los talleres Oerlikon de Suiza) construyó el primer transformador de 30 kV sumergido en aceite ; este valor de tensión era elevadísimo en aquel tiempo desde entonces, los transformadores utilizan aceite.

A 166 años de la invención del transformador, en la actualidad no se vislumbran cambios notables en las formas convencionales de generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica, es decir, seguirán existiendo subestaciones eléctricas como las que operan actualmente, quizás con algunas variantes, pero la transmisión y distribución de la energía eléctrica no tendrá cambios sustanciales, por lo que se puede concluir que el transformador seguirá utilizándose por mucho tiempo.

---

[1] Debido a la caída de voltaje a lo largo de las líneas de transmisión de corriente directa, la longitud de éstas debían se relativamente cortas ; esto requería tener plantas generadoras cercanas a los centros de consumo, lo que resultaba poco práctico y costoso.

DEFINICIÓN DE UN TRANSFORMADOR

Un transformador es un máquina eléctrica estática que □-□ (ver Fig. 2.1) :

a). Consta de dos o más circuitos eléctricos acoplados magnéticamente. Uno de los circuitos eléctricos (el devanado primario) se conecta a una fuente de potencia y el segundo circuito (el devanado secundario) entrega potencia eléctrica a la carga. Cuando existe un tercer devanado se llama terciario[2].

b). Al transferir la energía de un circuito a otro no cambia la frecuencia de los voltajes y corrientes, solamente cambian los niveles de voltaje y corriente.

c). Funciona en base al principio de inducción electromagnética, descubierto por M. Faraday. Este principio se presenta cuando a través de una bobina se hace pasar un campo magnético variable con el tiempo y se induce una voltaje en dicha bobina.

d).Los circuitos eléctricos (primario y secundario) están aisladas entre sí eléctricamente. La única conexión entre las bobinas es a través del flujo magnético que se establece en el núcleo.

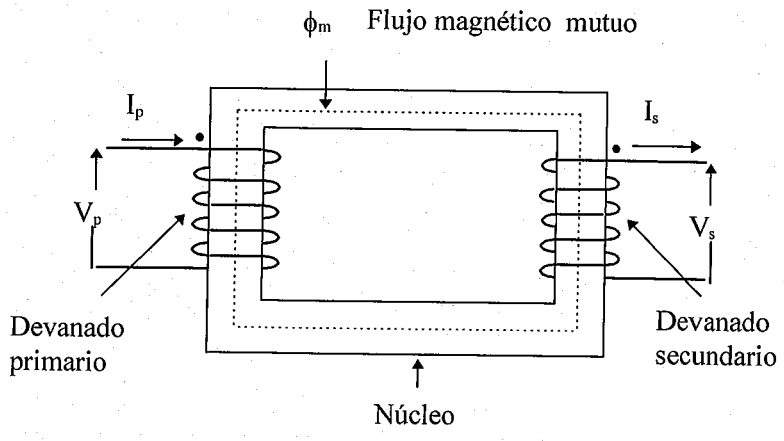


Fig. 2.1. Transformador con núcleo de hierro.

[2] Estos devanados suministran la tensión necesaria para los servicios auxiliares de la subestación o para una distribución local. Pueden conectarse al terciario condensadores estáticos o síncronos con objeto de corregir el factor de potencia.

Cuando se alimenta con una tensión de corriente alterna el primario del transformador, se induce una tensión en el secundario del transformador (éste puede estar abierto o cerrado). Ver Fig. 2.2.

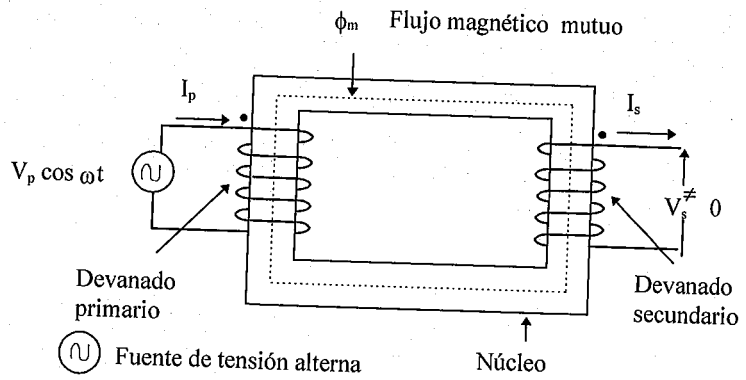


Fig. 2.2. Transformador con núcleo de hierro alimentado con una fuente de corriente alterna.

Sin embargo, cuando se alimenta con una tensión de corriente directa el primario del transformador, no se induce una tensión en el secundario del transformador (éste puede estar abierto o cerrado). Solamente se inducen voltajes en el secundario cuando se abre y se cierra continuamente el circuito primario. Ver Fig. 2.3.

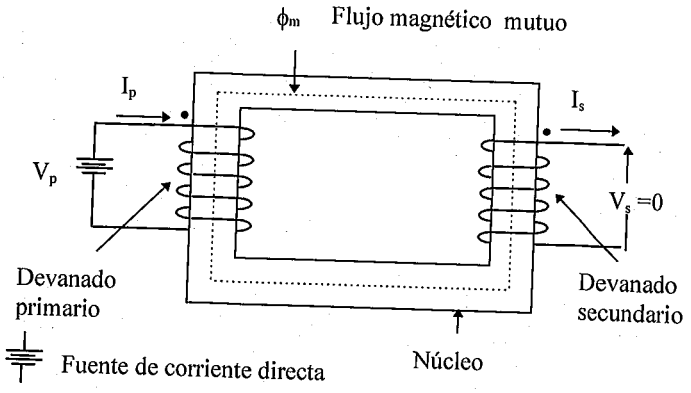


Fig. 2.3. Transformador con núcleo de hierro alimentado con una fuente de corriente directa

IMPORTANCIA DE LOS TRANSFORMADORES

Sin el transformador no se podría utilizar la potencia eléctrica en muchas de las formas en las que se utiliza en la actualidad. Un transformador cambia un nivel de voltaje de ca en otro nivel de voltaje[3], sin afectar la potencia real suministrada. En las centrales generadoras se eleva el voltaje para transmitirlo a largas distancias con pérdidas mínimas y se disminuyen en las subestaciones de distribución para su utilización. Las pérdidas en las líneas de transmisión se calculan con I^2 R, elevar el voltaje transmitido, reduce las pérdidas enormemente □,□. Ver. Fig. 2.4.

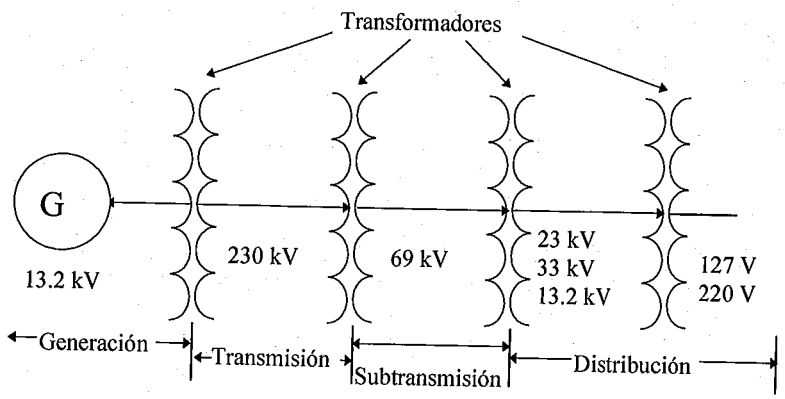


Fig. 2.4. Sistema de potencia eléctrico que muestra los componentes básicos.

- Clasificación de los transformadores

Los transformadores se clasifican de acuerdo a diferentes factores□-□:

a) Capacidad

- *Transformadores de distribución*. Son aquellos cuya capacidad se encuentra entre 5 y 500 KVA y los hay de diversos tipos en función de su uso o localización, por ejemplo : tipo poste, tipo pedestal, en bóveda, para red secundaria.

[3] Si eleva el nivel de voltaje de un circuito, debe disminuir la corriente para conservar invariante la potencia de entrada y de salida del transformador.

- *Tipo poste.* Diseñados para distribución aérea(montados en el poste). Pueden ser tipo monofásicos (normal, tipo YT, autoprotegido, tipo costa) y trifásico. Ver Fig. 2.5 y Fig. 2.6.

Los transformadores autoprotegidos están provistos de un apartarrayos de alta tensión, un fusible de expulsión en alta tensión y un interruptor en el secundario. Para la protección contra sobretensiones, el apartarrayos se monta directamente en el tanque del transformador. Para protección contra fallas secundarias y sobrecargas, se instala un interruptor térmico o termomagnético, dentro del transformador y se conecta entre la bobina y los aisladores de baja tensión. Para indicación visual de condiciones antieconómicas de carga, la luz de señalización se monta en la pared exterior del tanque del transformador cerca de la manija de operación del interruptor.

Los transformadores YT (estrella aterrizada) son comúnmente utilizados en zonas rurales. Tienen la característica de que permiten un ahorro en líneas de transmisión, ya que sólo se requiere una fase. El voltaje al que opera el devanado del transformador es menor al voltaje al que opera la línea.

El transformador tipo costa opera en ambientes de alto índice de contaminación. Esto se logra sustituyendo las boquillas de alta tensión por las correspondientes a la clase de aislamiento inmediata superior. Para poder realizar esta sustitución se requiere cambiar la cubierta del transformador.

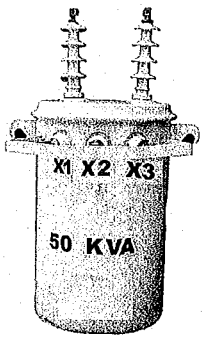


Fig. 2.5. Transformadores tipo poste monofásicos

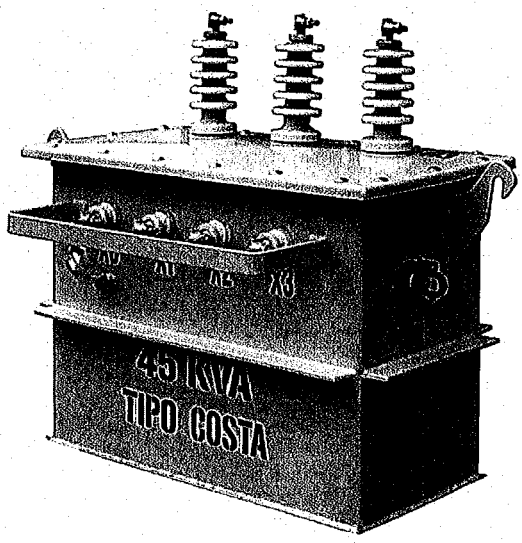


Fig. 2.6. Transformadores tipo poste trifásico

- *Tipo subestación.* Está diseñado para distribución trifásica local, es decir en el sitio de consumo. Se instala directamente sobre el piso, dentro de la subestación. Ver Fig. 2.7.

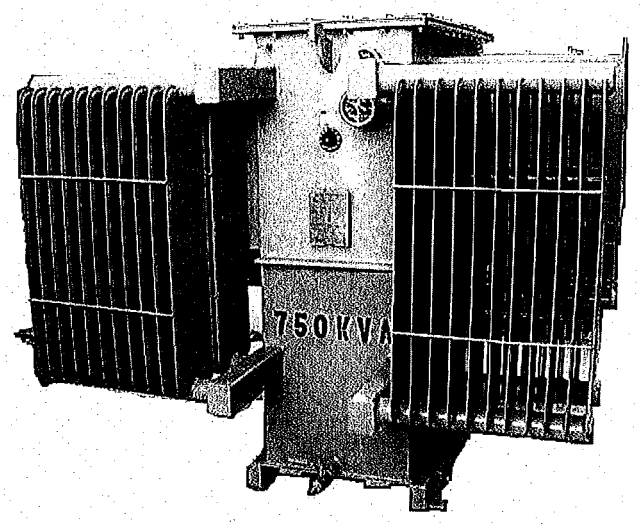


Fig. 2.7. Transformadores tipo subestación

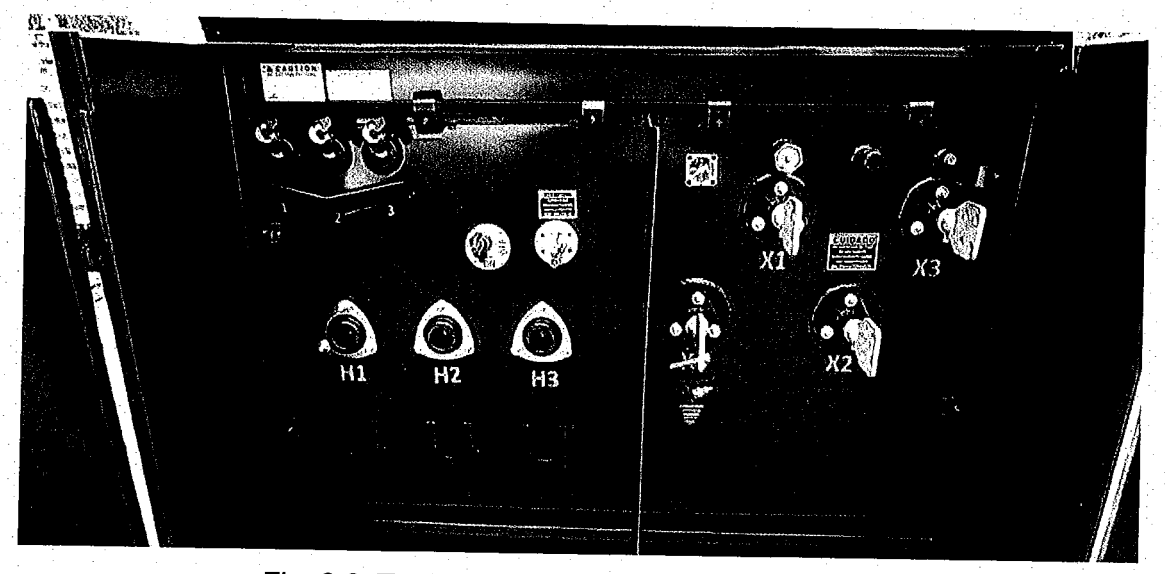


Fig. 2.8. Transformadores tipo pedestal trifásicos

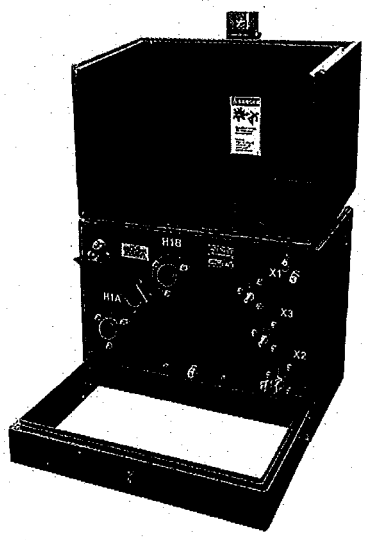


Fig. 2.9. Transformador tipo pedestal monofásico

- *Tipo pedestal.* Están diseñados para alimentar cargas de distribución residencial y comercial subterráneas, tales como : fraccionamientos, hoteles, hospitales y centros comerciales. Pueden ser monofásicos y trifásicos. Se llaman pedestales porque se instalan sobre un pedestal de concreto es espacios abiertos (jardines, aceras, camellones, etc.). Forman una subestación compacta que integra todos los elementos de conexión-desconexión y protección de la red. Ver Fig. 2.8 y Fig. 2.9.

Están diseñados para operar en sistemas de alimentación en anillo, como se muestra en la Fig. 2. 10, ya que cuentan con dos boquillas de alta tensión por fase. Sin embargo, pueden utilizarse en sistemas de alimentación radial utilizando una sola boquilla de alta tensión por fase. En operación radial el transformador es conectado en forma individual a la fuente de alimentación y los transformadores trifásicos tienen tres boquillas en el lado de alta tensión. Se dice que el transformador opera en anillo cuando el transformador puede ser alimentado por dos fuentes de alimentación diferentes. En este caso puede formar parte de un sistema de distribución que interconecte varios transformadores entre sí. La ventaja inherente de esta configuración es continuidad en el servicio. Para fines de identificación, los transformadores trifásicos (en operación en anillo) tienen 6 boquillas en el lado de alta tensión y los monofásicos tienen solamente dos boquillas en el lado de alta tensión.

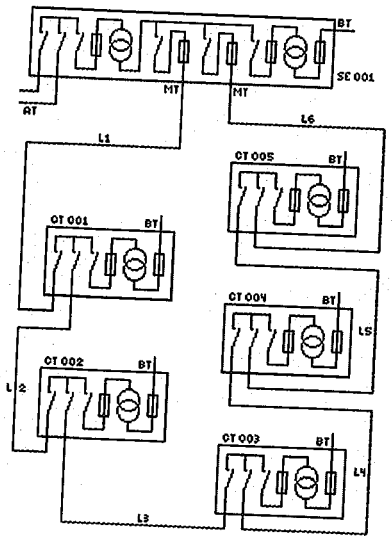


Fig. 2. 10. Alimentación en anillo

- *Tipo pozo (llamados también tipo bóveda o sumergibles[4]).* Se conectan en las redes de distribución subterráneas. Son instalados en bóvedas normalmente bajo el nivel del piso. Son apropiados para instalarse en lugares donde no se tiene espacio disponible a nivel de piso o bien en lugares donde se requiere seguridad por ser zonas muy

[4] Eventualmente pueden ser cubiertos por agua.

concurridas por personas. La mayor parte de sus accesorios son colocados en la cubierta del tanque del transformador. Al igual que los pedestales forman una subestación compacta que integra todos los elementos de conexión-desconexión y protección de la red (Ver Fig. 2.11). Están diseñados para operar en sistemas de alimentación en anillo o sistemas de alimentación radial.

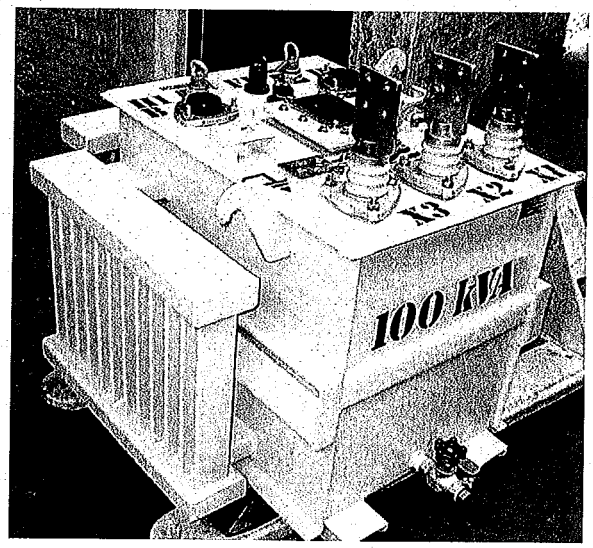


Fig. 2.11. Transformadores tipo pozo trifásicos

Transformadores de potencia. Son aquellos transformadores mayores de 500 kVA.

Los transformadores de pequeña potencia usualmente abarcan capacidades que van desde los 750 hasta los 3000 kVA. Estos pueden fabricarse con gargantas para acoplamiento a tableros de distribución. Se utilizan para cargas industriales. Ver Fig. 2.12.

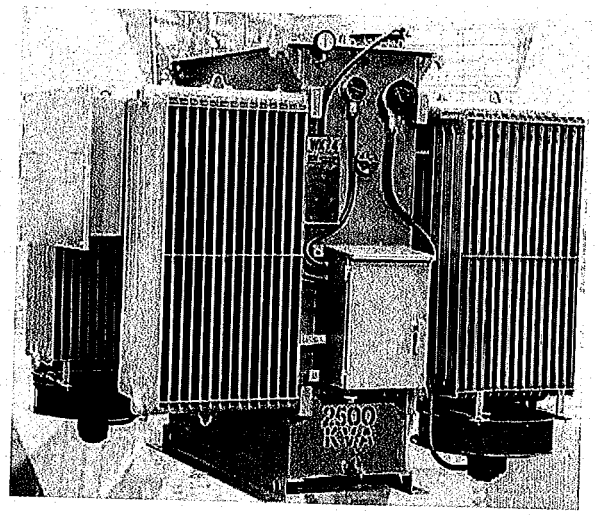


Fig. 2.12. Transformadores de pequeña potencia de 750 a 1500 kVA.

b) **Utilización**

Transformadores para generador. Son transformadores de potencia que van conectados a la salida del generador. Proporcionan la energía a la línea de transmisión.

Transformador subestación. Son transformadores de potencia que van conectados al final de la línea de transmisión para reducir el voltaje a nivel de subtransmisión.

Transformadores de distribución. Reduce el voltaje de subtransmisión a voltajes de consumo.

c) **Transformadores especiales.** Aquí se encuentran los reguladores de voltaje, ,transformadores para horno de arco eléctrico, autotransformadores, transformadores para mina, etc.

Reguladores de voltaje. Se alimentan con un voltaje variable y lo transforman a un voltaje uniforme mediante un cambiador de derivaciones que opera bajo carga.

Transformadores para horno de arco eléctrico. Los transformadores para horno suministran energía a los hornos eléctricos en los tipos de inducción, resistencia, arco abierto y arco sumergido. Por los secundarios de estos transformadores circulan altas corrientes[5].

[5] Esto se logra al conectar en paralelo muchas secciones del devanado.

Autotransformadores. Son transformadores en los que existe conexión entre el primario y el secundario del transformador. En el autotransformador, la misma bobina sirve como primario y secundario y se utiliza en aplicaciones donde la relación de transformación no difiere grandemente de la unidad y que no requiere que la bobina secundaria este aislada de la bobina primaria.

d) **Número de fases**

Monofásicos Son transformadores de potencia o de distribución que se conectan a una línea y un neutro. Tienen 1 devanado de alta tensión y 1 devanado de baja tensión.
Trifásicos. Tienen 3 devanados de alta tensión y 3 devanados de baja tensión. Pueden estar o no conectados a un neutro común.

e) **Sistemas de disipación del calor**

Tipo seco. Su aislamiento depende fundamentalmente de materiales que soportan hasta 180 ° C (mica, fibra de vidrio, resinas, etc.). Se enfrían por aire natural o aire forzado.
Sumergidos en líquido aislante. Su aislamiento depende de materiales que pueden operar hasta 130 ° C, sumergidos en líquidos aislantes tales como aceite mineral, silicón, etc.

f) **Transformadores para instrumento**

Son los transformadores que se utilizan para la conexión de los instrumentos. Existen dos tipos de transformadores de instrumento :

Transformadores de corriente (TC´s). Se conectan en serie con la línea para transformar altos valores de corriente a un valor nominal de aproximadamente 5 Amp para los amperímetros y los wattorímetros.

Transformadores de potencial (TP´s). Usualmente transforman voltajes altos a aproximadamente 115 Volts secundarios para alimentar voltímentros y wattorímetros además de los relevadores y aparatos de control.

g) **De acuerdo al medio refrigerante.** La capacidad de los transformadores (y en general de todo aparato eléctrico) está intimamente ligada a sus posibilidades de enfriamiento de las partes activas (conjunto núcleo bobinas) . El medio refrigerante de los transformadores sumergidos en aceite puede ser :

- Tipo ONAN (OA) (Oil-Air). Es un transformador sumergido en aceite con enfriamiento natural. Este es el enfriamiento más comúnmente utilizado y más económico. En estos transformadores el aceite dieléctrico circula por convección natural dentro del tanque con paredes lisas o corrugadas, o bien provisto de radiadores.
- Tipo ONAF (FA) (Force Air). Es básicamente una unidad OA a la que se le agrega un sistema de circulación forzada de aire a base de ventiladores para aumentar la disipación del calor en las superficies de enfriamiento. El empleo de este sistema de enfriamiento se recomienda cuando el transformador debe soportar sobrecarga durante períodos cortos.
- Tipo ONAN/ONAF/ONAF ($OA/FA_1/FA_2$) . Es básicamente una unidad OA a la que se le agrega un sistema de circulación forzada de aire a base de ventiladores en dos pasos (con dos grupos de ventiladores).
- Tipo ONAN/ONAF/OFAF (OA/FA/FO) (Force Oil). Transformador sumergido en aceite con enfriamiento propio, con enfriamiento a base de aire forzado y a base de aceite forzado. El arranque y parada de los ventiladores y bombas se controlan por la temperatura del aceite, se utilizan controles automáticos que seleccionan la secuencia de operación al aumentar la carga del transformador.
- Tipo OW (Oil- Water). Sumergido en aceite, y enfriamiento con agua. Este tipo de transformador está equipado con un cambiador de calor tubular colocado fuera del tanque. El agua de enfriamiento circula en el interior de los tubos y se drena por gravedad o por medio de una bomba independiente.

CANAME

SE SECRETARÍA DE ECONOMÍA

COMPONENTES PRINCIPALES DEL TRANSFORMADOR

Las partes externas más importantes del transformador de distribución sumergido en aceite son □-□:

a). *Tanque.* El tanque es el recipiente que contiene el conjunto núcleo bobinas y líquido refrigerante. Se construye con lámina de acero para proporcionar soporte mecánico, superficie de disipación de calor y protección contra la introducción de aire y humedad al interior del transformador.

b). *Boquillas aislantes (bushings)*. Permiten la entrada y la salida de los conductores de cada bobina a través del tanque. Están formadas por un cuerpo aislador y un conector o terminal. El aislador puede ser de porcelana o de resina epóxica.

c). *Válvula de muestreo y drenaje*. Normalmente se encuentra localizado en la parte inferior del tanque y se utiliza para hacer las extracciones de muestras de aceite y en algunos casos para efectuar el cambio de aceite del transformador.

d). *Conexión a tierra*. Consiste de un conector dispuesto en el exterior del tanque para conectarlo a tierra y desviar las posibles corrientes de fuga por fallas de aislamiento del transformador.

Algunos de los transformadores tienen además de lo anteriormente mencionado : aparatos indicadores del nivel de aceite, válvulas de seguridad, etc.

Las partes internas más importantes del transformador son las siguientes :

a). *Núcleo.* El núcleo es de un material formado de láminas (acero al silicio) aisladas entre sí y sirve para canalizar y aumentar la intensidad del campo magnético.

b). *Las bobinas*. Constituyen los circuitos de alimentación y de carga ; pueden ser de alambre delgado o grueso dependiendo de la corriente. La función del devanado primario es crear un campo magnético y utilizar el flujo para inducir un voltaje en el secundario.

c). *Las derivaciones (taps).* Generalmente se encuentran en las bobina de alta tensión del transformador y sirven para hacer variar el número de vueltas de la bobina.

d). *Aceite*. Cumple dos funciones importantes a saber : para el enfriamiento del interior del transformador cuando está en operación y como aislamiento entre las bobinas y entre las bobinas y el tanque.

PRINCIPIO BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR

El fenómeno de inducción electromagnética toma lugar solamente en el transformador cuando el flujo magnético es variante en el tiempo[6]. Si se voltaje de ca se aplica al primario del transformador con el devanado secundario en circuito abierto, una corriente muy pequeña fluirá por el primario y tiene la función de magnetizar el núcleo y alimentar las pérdidas del hierro del transformador. De esta manera un flujo magnético se establece en el núcleo, lo cual induce un voltaje tanto en el circuito primario y secundario □-□. El flujo magnético que eslabona ambas bobinas tiene la forma :

$$\phi = \phi_m \operatorname{sen}(\omega t) \qquad (2.1)$$

Aplicando la Ley de Faraday, el voltaje inducido en el devanado primario está dado por :

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \qquad (2.2)$$

$$e_1 = N_1 \square\square\square\square_m \cos(\square\square t) \qquad (2.3)$$

como □ = 2 □f

$$e_1 = 2\,\square f\, N_1\, \square\square\square_m \cos(\square\square t) \qquad (2.4)$$

[6] En el caso de que se aplique voltaje de cd al primario del transformador se inducirá voltaje en el secundario solamente si se abre y cierra continuamente el circuito primario.

Expresando e_1 en valor eficaz[7] :

$$e_{1(rms)} = \frac{2\,\Pi\, f\, N_1\, \phi_m}{\sqrt{2}} \qquad (2.5)$$

Puesto que □$_m$ =AB$_m$,entonces :

$$e_{1(rms)} = 4.44\, f\, N_1\, A\, B_m \qquad (2.6)$$

en donde □= Frecuencia angular, rad/seg

B_m = Densidad de flujo máxima, Teslas[8]

A= Sección transversal del núcleo, m^2

f= Frecuencia de la fuente de alimentación, Hz

□□$_m$□ Flujo magnético máximo a través del núcleo, weber

N_1, N_2 = Número de vueltas en el primario y secundario respectivamente

e_1 , e_2 = Valor instantáneo del voltaje inducido en el primario y secundario respectivamente, Volts

$e_{1(rms)}$, $e_{2(rms)}$ = Valor eficaz del voltaje inducido en el primario y secundario respectivamente, Volts

Similarmente el voltaje secundario eficaz inducido en el secundario está dado por :

$$e_{2(rms)} = 4.44\, f\, N_2\, A\, B_m \qquad (2.7)$$

---

[7] El valor rms (root-mean-square) de una función f(t) se encuentra por medio de la expresión :

$A_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T [f(t)]^2 dt}$, donde T es la longitud de un período de la forma de la onda (en segundos).

[8] El valor de B_m tiene un límite superior debido a las pérdidas del hierro, la corriente de energización, así como también a la magnitud y distorsión de la corriente de magnetización. Para transformadores varía de 1.4...1.8 Teslas.

Las expresiones (2.6) y (2.7) se pueden escribir como :

$$\frac{e}{N} = 4.44\ f\ A\ B_m \tag{2.8}$$

e/N son los volts por vuelta, los cuales son iguales para ambos devanados. En el diseño de transformadores B_m , A y f se conocen, así que las vueltas de cada devanado se determinan del voltaje especificado del devanado y de los volts por vuelta especificados.

CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR

Uno de los aspectos más importantes para el análisis del comportamiento de los transformadores lo constituyen los circuitos equivalentes, éstos deben reproducir de manera bastante aproximada el fenómeno físico a ser estudiado. Estrictamente, un transformador podría ser representado por una red compleja de resistencias, inductancias y capacitancias. La influencia de cada uno de estos parámetros en el transformador se considera de acuerdo con el fenómeno a ser estudiado. En otras palabras, los circuitos equivalentes del transformador pueden tener diferentes formulaciones matemáticas dependiendo del contexto de estudio □. De este modo un transformador se puede modelar como :

- Inductancia
- Red de capacitancias
- Combinación de las dos anteriores
- Inductancia no lineal
- Dependiente de la frecuencia

El circuito equivalente que se explica en la presente sección corresponde al comportamiento eléctrico y magnético del transformador en baja frecuencia[9]. En la Fig. 2.13 se muestra el circuito equivalente de un transformador real.

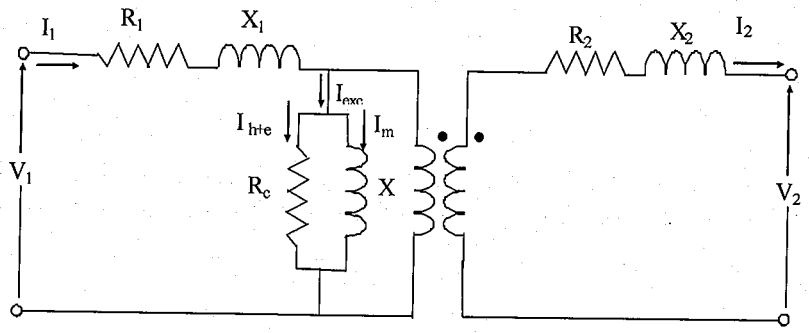


Fig. 2.13. Circuito equivalente del transformador

En el circuito de la Fig. 2.13 el subíndice 1 se refiere al primario y la 2 al secundario del transformador.

La corriente de excitación del transformador es la corriente que fluye por el primario cuando el secundario del transformador está en circuito abierto. La corriente de excitación está formada por dos componentes : la corriente de pérdidas en el núcleo (I_{h+e}) y la corriente de magnetización (I_m). La corriente de pérdidas en el núcleo es una componente de potencia real y se debe a las pérdidas en el núcleo. La corriente de magnetización es la responsable de que un flujo magnético circule por el núcleo.

La Fig. 2.14.a es un circuito equivalente del transformador referido a su lado primario y la Fig. 2.14.b es el circuito equivalente referido al lado secundario.

Por la rama de excitación circula muy poca corriente en comparación con la corriente I_1 en estado estable ; por esta razón se puede trabajar con un circuito equivalente simplificado, en el cual la rama de excitación se mueve hacia la entrada del transformador y las

[9] Esto es, a frecuencia de 50 Hz y 60 Hz

impedancias del primario y secundario se combinan en serie. Esto se indica en la Fig. 2.15.

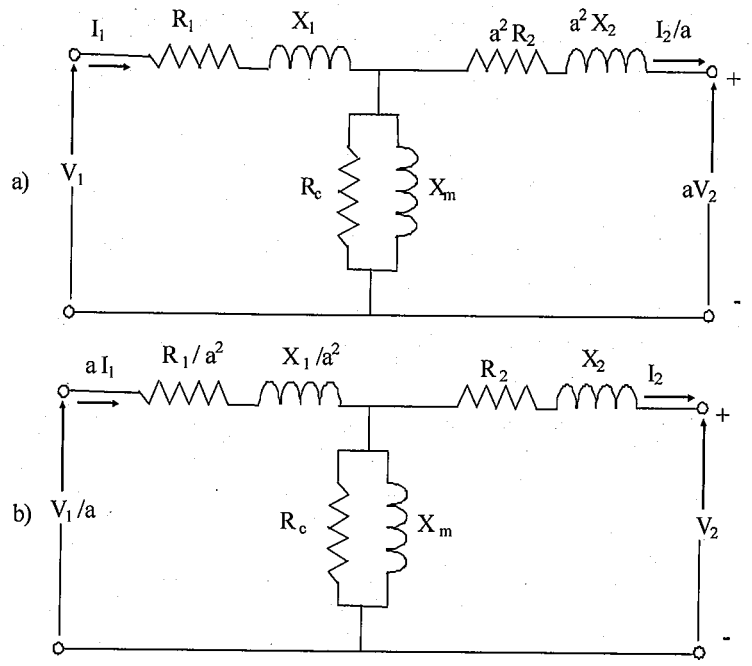


Fig. 2.14. a). Modelo del circuito equivalente del transformador referido al primario, b). Modelo del circuito equivalente del transformador referido al secundario.

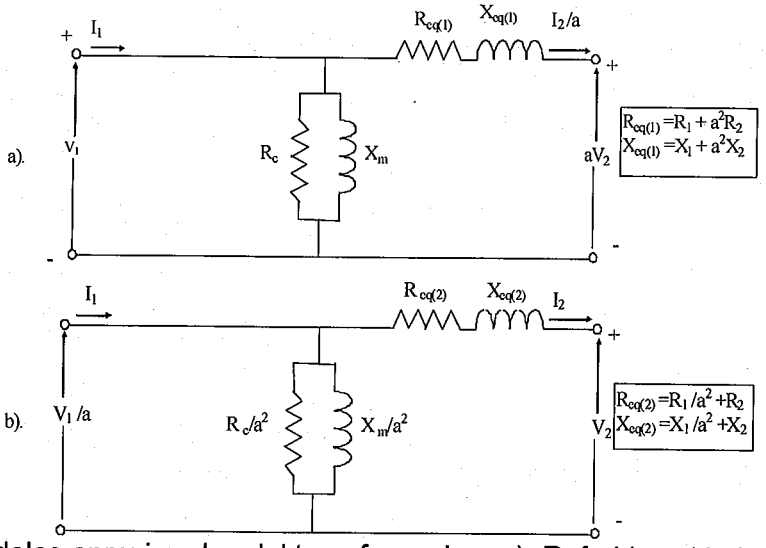


Fig. 2.15. Modelos aproximados del transformador : a). Referidos al lado primario ; b). Referidos al lado secundario.

En algunas aplicaciones, la rama de excitación puede eliminarse totalmente sin causar error apreciable. En este caso, los circuitos equivalentes del transformador se muestran en la Fig. 2.16.

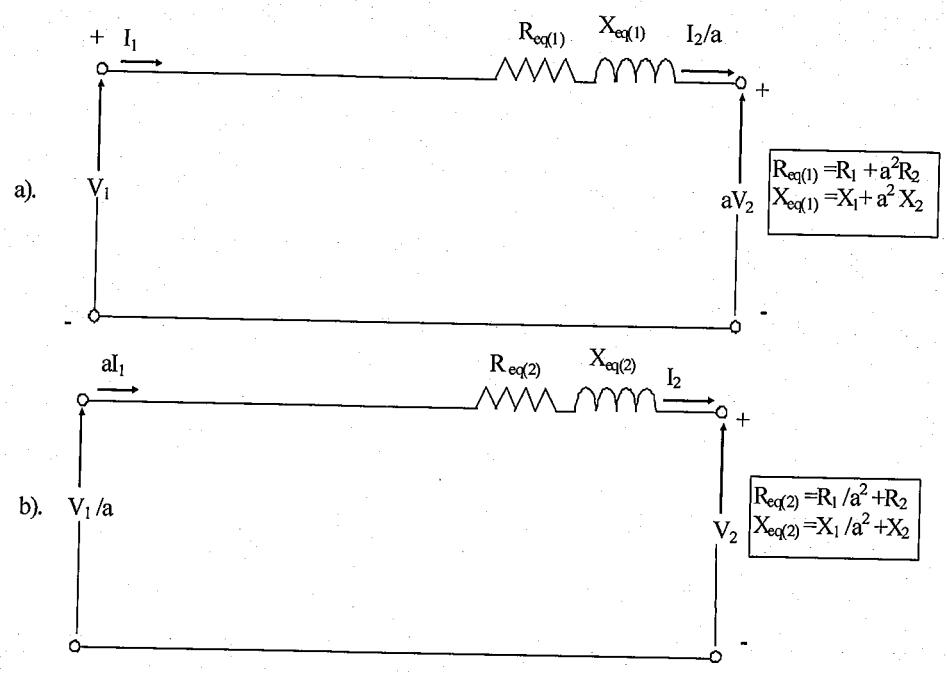


Fig. 2.16. Modelos aproximados del transformador sin rama de excitación : a). Referidos al lado primario ; b). Referidos al lado secundario.

CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR

Los parámetros del circuito equivalente se pueden obtener de las pruebas de circuito abierto y corto circuito □.

La prueba de circuito abierto proporciona los parámetros de la rama de excitación y consiste en poner en circuito abierto el devanado secundario, en tanto el devanado primario se conecta a la línea a voltaje nominal ; en estas condiciones, la corriente (casi en su totalidad) debe fluir a través de la rama de excitación del transformador. Los elementos R_1 y X_1 se pueden considerar despreciables en comparación con R_c y X_m , ya que producen una caída de voltaje no significativa, así que todo el voltaje de alimentación

se aplica a través de la rama de excitación. Se deben tomar lecturas de voltaje, corriente y de potencia real como se muestran en la Fig. 2.17.a

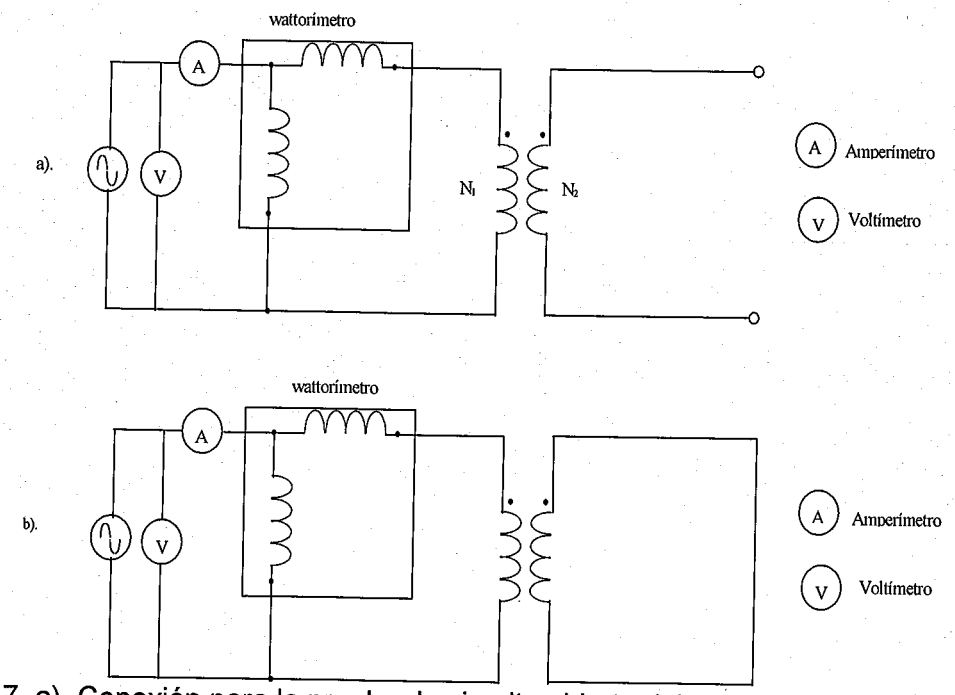


Fig. 2.17. a). Conexión para la prueba de circuito abierto del transformador, b). Conexión para la prueba de cortocircuito.

En la prueba de cortocircuito se cortocircuitan las terminales secundarias del transformador y el primario se alimenta de una fuente de voltaje ; el voltaje de alimentación se ajusta hasta que la corriente del devanado de cortocircuito alcanza la corriente nominal. Se deben tomar lecturas de voltaje, corriente y de potencia real, tal como se indica en la Fig. 2.17.b.

De la prueba de circuito abierto, la admitancia de excitación está dada por[10] :

$$Y_E = \frac{I_{oc}}{V_{oc}} \angle -\theta = \frac{1}{R_c} - j\frac{1}{X_m} \qquad (2.\ 9)$$

[10] Esta cantidad está expresada en forma fasorial y los fasores son cantidades complejas. Utilizando la identidad de Euler, se tiene que $F\angle\theta = F(\cos(\theta) + j\,\mathrm{sen}(\theta))$

donde $\cos(\theta) = \dfrac{P_{oc}}{V_{oc}\ I_{oc}}$

La impedancia serie referida al lado primario del transformador se calcula mediante :

$$Z_{SE} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \angle\theta = R_{eq} + j\,X_{eq} = (R_1 + a^2 R_2) + j(X_1 + a^2 X_2) \qquad (2.10)$$

Donde $\cos(\theta) = \dfrac{P_{sc}}{V_{sc}\ I_{sc}}$

EFICIENCIA DEL TRANSFORMADOR

La eficiencia de un transformador se define por :

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} 100\ \% \qquad (2.\ 11)$$

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{sal} + P_{perdidas}} 100\% \qquad (2.12)$$

La eficiencia de los transformadores son algo mayores que las de las máquinas rotativas, para la misma capacidad en KVA, debido a que estas últimas poseen pérdidas adicionales.

Las pérdidas que se presentan en transformadores son las siguientes :

a). <u>*Pérdidas en el cobre* (I^2 R).</u> Estas son debidas a la resistencia primaria y secundaria del transformador.

b). *Pérdidas por histéresis*[11]. Esta pérdida depende de la calidad de las láminas del núcleo utilizado. Es proporcional al peso del material utilizado y varía de acuerdo al valor de la densidad de flujo. Para minimizar estas pérdidas, el peso del material debería mantenerse tan bajo como se pueda y la densidad de flujo no debería ser alta. Sin embargo, la disminución de la densidad de flujo para reducir las pérdidas por histéresis implica el uso de una gran cantidad de hierro, el cual incrementa las pérdidas. Las pérdidas de histéresis varían directamente con la frecuencia.

c). *Pérdidas por corrientes parásitas*. La ley de Faraday explica las pérdidas por corrientes parásitas : un flujo variable en el tiempo, induce voltajes dentro del núcleo ferromagnético, ver Fig. 2.18. Estos voltajes causan remolinos de corriente, que al fluir por el núcleo originan calentamiento. Estas pérdidas son dependientes de la densidad de flujo utilizada, la calidad de las láminas del núcleo, el espesor de las láminas y de la eficiencia del aislamiento entre las láminas del núcleo. Estas pérdidas son proporcionales al cuadrado de la frecuencia. Las pérdidas de este tipo pueden ser reducidas, al reducir el espesor de las láminas, pero se presentan las siguientes desventajas :

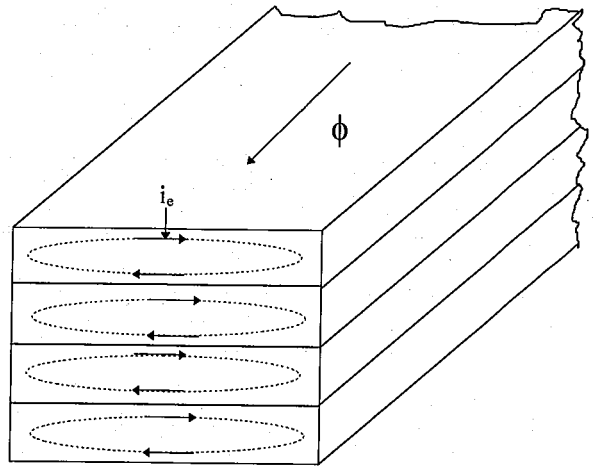


Fig. 2.18. Corrientes de eddy en un núcleo laminado. La corriente de eddy (i_e)depende del flujo
por lámina y de la resistencia de la lámina.

[11] El tamaño del lazo de histéresis es proporcional a las pérdidas de histéresis.

- La suma total de los espesores del aislamiento entre las láminas es alto y se obtiene un factor de apilamiento.
- Es más difícil la manufactura del transformador.
- Mecánicamente los núcleos son más débiles.

Ya que la potencia de salida es :

$$P_{sal} = V_2 I_2 \cos \theta_2 \qquad (2.\ 13)$$

La eficiencia del transformador se puede expresar por :

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{cu} + P_{nucleo} + V_2 I_2 \cos\theta_2} 100\ \% \qquad (2.\ 14)$$

En la Fig. 2.19 se muestra la variación de la eficiencia de un transformador[12] en función de carga y a diferentes factores de potencia.

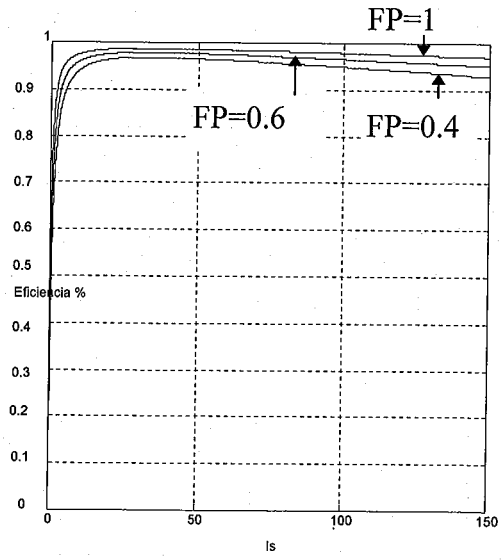


Fig. 2.19. Eficiencias del transformador contra corriente secundaria a diferentes factores de potencia,

[12] De 15 kVA de 2300/230, monofásico a 60 Hz

La eficiencia máxima tiene lugar cuando las pérdidas en el hierro son iguales a las pérdidas del cobre[13], es decir, $P_{núcleo} = (I_2)^2 R_{eq(2)}$.

Para valores constantes de V_2 y I_2 , la máxima eficiencia ocurre cuando : $\frac{d\eta}{d\theta_2} = 0$, es decir, cos(□$_2$)=1.

La eficiencia se define por (Ver Fig. 2.20):

$$\eta = \frac{C}{P_{Dev} + P_{fe} + C} 100\ \% \qquad (2.15)$$

donde :

□ = Eficiencia

C=Capacidad nominal del transformador en kVA

P_{fe}= Pérdidas máximas en el núcleo a tensión nominal en kW

Pd_{ev}=Pérdidas máximas en los devanados a capacidad nominal kW a 85°C ó 75°C

Observaciones importantes de la Fig. 2.20 son las siguientes :

- A mayor capacidad del transformador se exige mayor eficiencia.
- A menor clase de aislamiento se tiene mayor eficiencia.

---

[13] Suponiendo V_2 y FP = cos (θ_2) constantes el máximo se calcula de $\frac{d\eta}{dI_2} = 0$

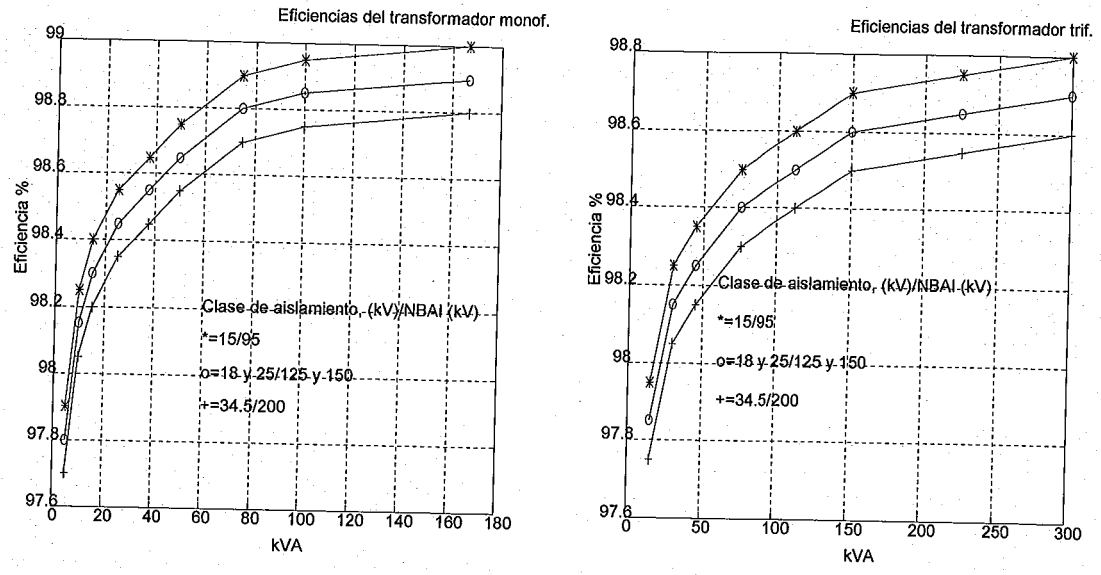


Fig. 2.20 Eficiencias exigidas en México para transformadores monofásicos y trifásicos.

NUCLEO DEL TRANSFORMADOR

a) Materiales utilizados en los núcleo

El material más comúnmente empleado en la fabricación de núcleos de transformadores se conoce como lámina de acero al silicio. Esta lámina consiste fundamentalmente de una aleación de hierro y silicio de bajo contenido de carbón y es obtenida a través de un proceso de rolado en frío. Adicionalmente, ambas caras de la lámina se recubren con un material aislante conocido como Carlite (Nombre patentado por la Cía ARMCO). Comercialmente existen varios tipos de aceros al silicio de diferentes espesores y pérdidas. Las tabla 2.1 muestra un resumen de las características de aceros al silicio fabricados por la compañía ARMCO □.

Tabla 2. 1. Designaciones del American Iron Steel Institute (AISI) y nombre comercial de la compañía ARMCO para aceros al silicio.

Tipo	Grado designación AISI	Nomenclatura ARMCO
Aceros al silicio no orientados	M-15 M-19 M-22 M-27 M-36 M-43 M-45 M-47	DI-MAX M-15 DI-MAX M-19 DI-MAX M-22 DI-MAX M-27 DI-MAX M-36 DI-MAX M-43 DI-MAX M-45 DI-MAX M-47
Aceros al silicio orientados	M-3 M-4 M-5 M-6	M-3 Orientado M-4 Orientado M-5 Orientado M-6 Orientado
Aceros al silicio orientados de alta permeabilidad		TRAN-COR H-1 TRAN-COR H-2

b) Acero amorfo

Con el propósito de reducir las pérdidas energía en la operación de los transformadores, se ha desarrollado un nuevo material para núcleos de transformadores llamado acero amorfo, el cual tiene la característica de producir pérdidas de excitación del orden del 25 % respecto al acero al silicio convencional. El acero amorfo es un material de estructura molecular no cristalina que se forma en pequeñas cintas por enfriamiento rápido del material fundido, lo cual evita que se cristalice durante la solidificación. La composición de estos aceros consiste aproximadamente de 80 % de hierro y 20 % de metaloides tales como boro y silicio y su espesor es reducido (del orden de 0.10 mm), por lo cual, la manufactura del núcleo constituye uno de los problemas más importantes por resolver □-□.

c) Clasificación de los núcleos

Los núcleos que se utilizan en los transformadores de distribución y en los transformadores de potencia (ver Fig. 2.21), se clasifican en dos grupos:

a). *Tipo acorazado*. En éste el circuito magnético rodea a la bobina.

b). *Tipo columna*. Es aquel en el cual la bobina envuelve al circuito magnético.

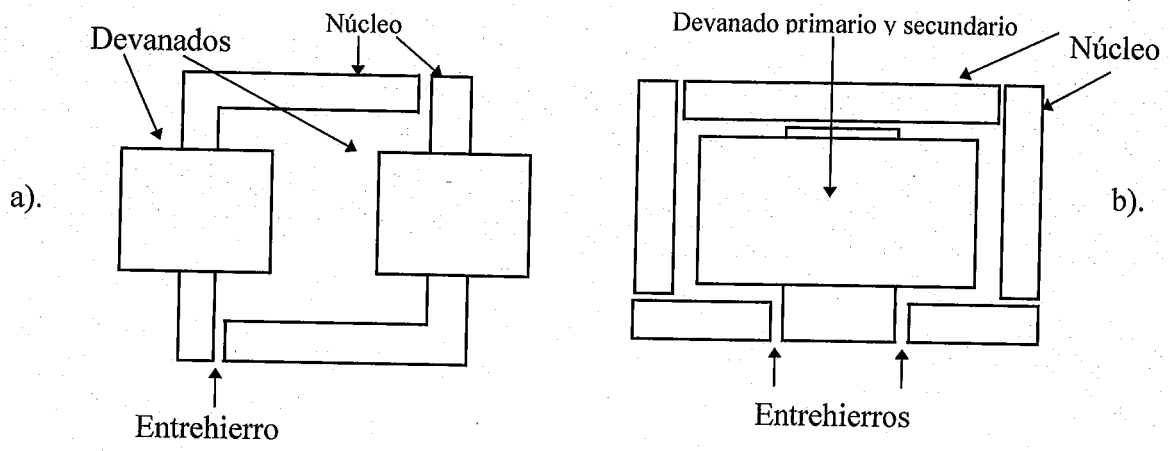


Fig. 2.21 Tipos de núcleos, a). Tipo columna, b). Tipo acorazado.

La selección de la construcción tipo columna o bien del tipo acorazado está en función del costo, tensión nominal, capacidad nominal, peso, resistencia mecánica y distribución del calor.

Desde el punto de vista de ensamble de las laminaciones del núcleo, los núcleos se clasifican de la siguiente manera :

a). *Núcleo apilado*. Se forma de varias láminas cortadas y apiladas, generalmente una por pierna y una o dos por yugo. Su sección transversal puede ser transversal o cruciforme. Se utiliza tanto en los transformadores de distribución y de potencia. Ver Fig. 2.22.

b). *Núcleo enrollado*.

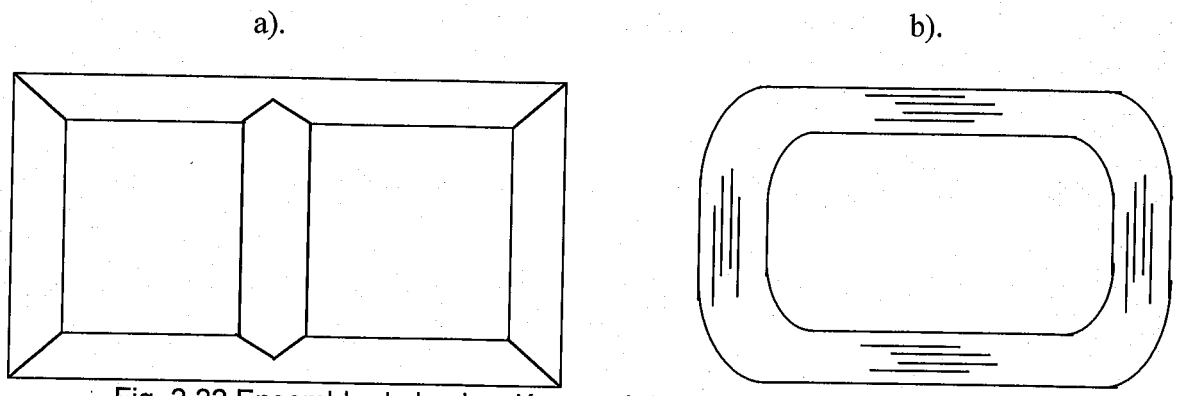


Fig. 2.22 Ensamble de laminación en núcleos, a). Núcleo trifásico apilado, b). Núcleo monofásico enrollado.

d) Factor de destrucción

Durante la fabricación del núcleo, la lámina de acero al silicio se somete a esfuerzos mecánicos, tales como corte, tensión, compresión, etc. Estos esfuerzos originan cambios en la orientación de los dominios magnéticos del acero eléctrico, disminuyendo la permeabilidad magnética y como consecuencia incrementan las pérdidas del material. Tal incremento puede alcanzar valores del 300 % del valor de pérdidas correspondiente a la lámina virgen.

Con el fin de recuperar las características de magnetización originales, el núcleo se somete a un proceso de recocido a una temperatura aproximada a los 780 °C. Posterior a este calentamiento sigue un período de enfriamiento natural. Con este proceso el núcleo puede recuperar prácticamente sus propiedades magnética originales.
El factor de destrucción se calcula mediante

$$F_{DESTRUCCION} = \frac{P_{NT}}{P_{LV}} \qquad (2.16)$$

Donde :

P_{NT} = Pérdidas en el núcleo del transformador
P_{LV} = Pérdidas en la lámina virgen

Los valores típicos del factor de destrucción de los transformadores van de 1.1 a 1.2 dependiendo del número de fases y del tipo del núcleo.

e) Factor de apilamiento

Cuando un núcleo se ensambla, las láminas que los forman se encuentran separadas por pequeños espacios de aire además del aislamiento de las láminas llamado "carlite". Por esta razón la sección transversal exterior del núcleo no representa la sección transversal correspondiente exclusivamente al acero eléctrico.

CANAME

SE
SECRETARÍA DE ECONOMÍA

REFERENCIAS

- E. Braun, *Electromagnetismo : de la ciencia a la tecnología*, la ciencia/112 desde México,1992.
- V. Ivanov-Smolenski, *Máquinas eléctricas*, tomo I, Editorial Mir Moscú, 1984.
- S. Siskind, *Electrical Machines,* Second edition, International Student Edition, McGraw-Hill International Book Company, Japan, 1959.
- Gourishankar, *Conversión de energía electromecánica*, Representaciones y Servicios de México, México, 1975 (Traducido del inglés).
- L. W. Matsch, *Máquinas electromagnéticas y electromecánicas*, Alfaomega, México, 1990.
- S. J. Chapman, *Máquinas eléctricas,* McGraw-Hill, México, 1987.
- R. L. Bean, N. Chackan, H. R. Moore, E. C. Wentz, *Transformers for the Electric Power Industry,* Westinghouse Electric Corporation, 1959.
- Kind and H. Kärner, *High-Voltage Insulation Technology*, Friedr. Vieweg & Sohn Braunschweig/Weisbaden, Germany, 1985, (Translated from the German).
- C. Franklin, D. P. Franklin, The J&P *Transformer book*, Butterworths, 11th edition, England, 1988.
- G. Enríquez, *Curso de transformadores y motores trifásicos de inducción*, Limusa Noriega Editores, México, 1995.
- G. Hernández, *Diseño de transformadores.* Instituto de Investigaciones eléctricas, Cuernavaca, Morelos, México, 1991.
- J. Flores, *Transformadores (Fascículo 1),* Comisión Federal de Electricidad, México, 1994.
- J. H. Kuhlmann, *Diseño de aparatos eléctricos*, Compañía Editorial Continental, México, 1959.
- M. Liwschitz-Garik, et al. *Máquinas de corriente alterna*, Compañía Editorial Continental, México, 1970.
- R. Feinberg(Editor), *Modern Power Transformer Practice*, The Macmillan Press Ltd, Great Britain, 1979.

- Fitzgerald, C. Kingsley, A. Kusko, *Teoría y análisis de las máquinas eléctricas*, Segunda edición, Editorial Hispano Europea, México, 1984.
- E. Staff-M.I.T., *Circuitos magnéticos y transformadores*, Editorial Reverté, Argentina, 1981.
- J.C. Olivares, *Modelado de la distribución de sobretensiones transitorias en los devanados del transformador,* Tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Morelia, 1997.
- Ras, *Transformadores de potencia, de medida y de protección*, Marcombo Boixareu Editores, Textos monográficos de electrotecnia, España, 1983.
- Armco Oriented and TRAN-COR H Electrical Steels. Tenth Edition, 1986.
- D. Kind and H. Kärner, *High-Voltage Insulation Technology*, Friedr. Vieweg & Sohn Braunschweig/Weisbaden, Germany, 1985, (Translated from the German).
- D. M. Nathasingh, "Transformers Applications of Amorphous Alloys in Power distribution Systems," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No.3, July 1987.
- D. W. Whitley, "Type Testing of Amorphous Metal Distribution Transformers," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No.3, July 1987.
- M. N. Sarwate, et al, "Amorphous Core Transformers-Energy Conservation and Field Experience," Research and Development Cell, M.P. Electricity Board, Jabalpur, January-March 1995.

CANAME

SE

SECRETARÍA
DE ECONOMÍA

Solicitud de Apoyo Programa para el Desarrollo de las Industrias de Alta Tecnología (PRODIAT)

DISEÑO 2

CANAME

SE
SECRETARÍA
DE ECONOMÍA

DISEÑO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN TIPO POSTE CON DEVANADOS COBRE-ALUMINIO Y NÚCLEO DE ACERO AMORFO

ÍNDICE

1. Introducción

   Planteamiento del Problema
   Justificación del Proyecto

2. Objetivo General

3. Estudio Técnico

4. Ingeniería Básica
   4.1. Diseño Eléctrico del Transformador
   4.2. Diseño del Núcleo
   4.3. Diseño de las Bobinas de Media y Baja Tensión
   4.4. Diseño de Aislamientos
   4.5. Cálculo del Peso del Transformador

5. Ingeniería de Detalle
   5.1. Diseño de Moldes para Núcleo
   5.2. Diseño del Bastidor
   5.3. Diseño de Partes para Tanque
   5.4. Diseño de Cubierta
   5.5. Diseño de Tanque y Accesorios
   5.6. Plano de Dimensiones Generales

6. Cálculo de Enfriamiento del Transformador

7. Cálculo de Corto Circuito

8. Evaluación del Proyecto

9. Conclusiones

10. Bibliografía

1. Introducción

Planteamiento del Problema

Se requiere diseñar un nuevo prototipo de un transformador trifásico de distribución de 75 MVA, con núcleo de acero amorfo y devanados cobre-aluminio, con el fin de que los transformadores de distribución de la empresa cumplan con los requisitos de eficiencia de la NOM 002 SEDE-2012, ya que se ha demostrado que el uso del acero amorfo en núcleos de transformadores de distribución reduce las pérdidas sin carga, de manera considerable.

Justificación del Proyecto

Debido a las exigencias ambientales, los transformadores deben ser más eficientes, con el fin de que haya menos emisiones contaminantes, asociadas con las pérdidas de potencia eléctrica en el transformador. Además, los costos asociados con las pérdidas deben reducirse, con el fin de que el transformador sea competitivo con respecto a los transformadores fabricados actualmente.

2. Objetivo General

Desarrollar un transformador prototipo de 75 KVA, 23000 V en Media Tensión, con Protocolo de CFE.

3. Estudio Técnico

Objetivo Específico

Desarrollar la ingeniería y manufactura de transformadores con núcleo de acero amorfo, de acuerdo a los nuevos valores de la NOM 002 SEDE-2012.

4. Ingeniería Básica

4.1. Diseño Eléctrico del Transformador

Características Generales del Transformador

Capacidad nominal: 75 KVA	Número de fases: 3
Frecuencia nominal: 60 Hz	Elevación de temperatura: 65°C
Tipo: OA	Altura de operación: 2300 msnm
Relación nominal: 23000/220 V	Conexión: Delta-Estrella
Derivaciones: 2.5% 2/-2	24150-23575-23000-22425-21850 V
% Impedancia: 2.45	% Reactancia: 2.0448
% Resistencia: 1.3522	Eficiencia al 100 %: 98.58 %
Eficiencia NMX-J-285: 98.4%	Pérdidas en Vacío: 69 W
Pérdidas cobre: 1014 W	Pérdidas totales: 1083 W

4.2. Diseño del Núcleo

El núcleo va a diseñarse con acero amorfo 2605SA1, marca Metglas, el cual presenta pocas pérdidas sin carga, al ser usado en transformadores de distribución, además de que posee valores altos de permeabilidad magnética. Las láminas de acero amorfo 2605SA1 presentan las siguientes características:

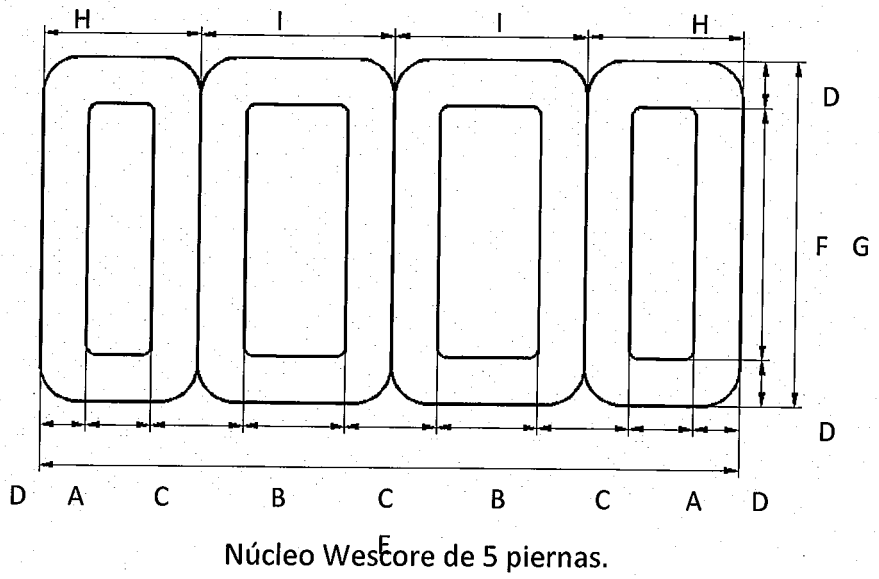
Características del Acero Amorfo

Característica	Valor	Unidades
Densidad de flujo magnético a 60 Hz y 80 A/m	≥1.35	T
Pérdidas en el núcleo, a 60 Hz y 1.3 T	≤0.17	W/kg
Pérdidas en el núcleo, a 60 Hz y 1.4 T	≤0.2	W/kg
Potencia aparente de excitación, a 60 Hz y 1.4 T	≤1.1	VA/kg
Saturación magnética	1.56	T
Resistividad eléctrica	1.3	μΩ/m
Temperatura de Curie	395	°C
Densidad	7.18	g/cm^3
Fuerza de tensión	2000	N/mm^2
Coeficiente de expansión térmica 30-300 °C	$7.6*10^{-6}$	1/°C
Espesor de la tira	25±4	μm
Factor de laminación	≥84	%

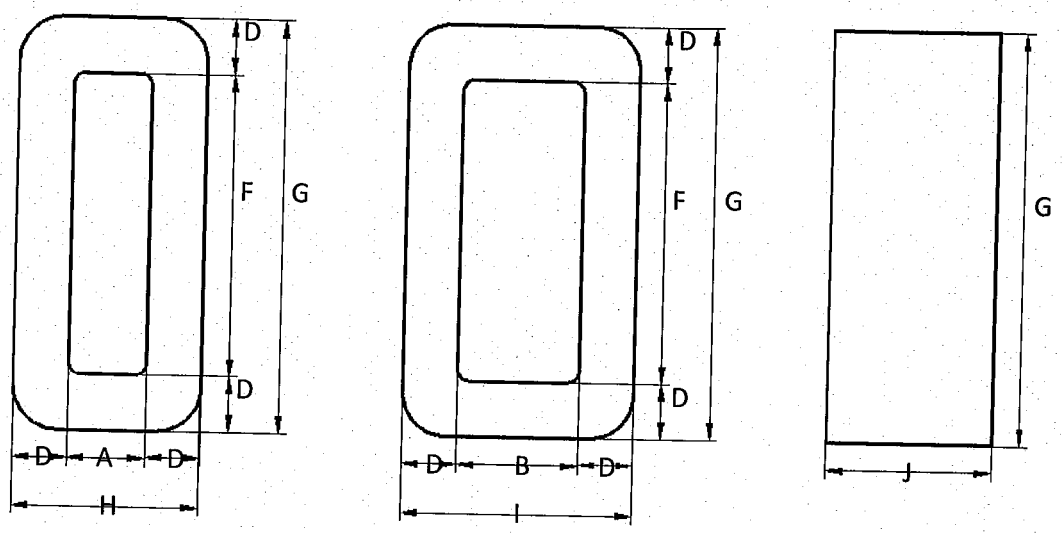
El núcleo es del tipo Wescore, de cinco piernas, con dos arcadas centrales y dos laterales, con las siguientes dimensiones, en mm:

Dimensiones del Núcleo del Transformador

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
66	116	114	57	820	265	379	180	230	170



Núcleo Wescore de 5 piernas.



a) b) c)

Arcadas del núcleo: a) Arcada chica. b) Arcada grande. c) Vista lateral de las arcadas.

El núcleo tiene las siguientes características:

Área geométrica de sección total: 193.8 cm^2	Área efectiva: 187.02 cm^2
Carga para área efectiva: 14676 G	Factor de laminación: 0.84
Factor de espaciamiento: 0.965	Peso arcadas centrales: 112.003 kg
Peso arcadas laterales: 100.282 kg	Peso total: 212.284 kg
Corriente de excitación: 0.01 A	Inducción: 14500 G
W/kg: 1.5	VA/kg: 2.
Watts hierro columnas: 36	Watts hierro yugos: 32
Watts hierro totales: 69	

4.3. Diseño de Bobinas de Media y Baja Tensión

Las bobinas de media tensión se fabrican de alambre de cobre tipo magneto, calibre 21, mientras que las de baja se fabrican de lámina de aluminio, marca Azinsa. Las bobinas tienen las siguientes características:

Características de las Bobinas

Media tensión	Baja tensión
Volts de fase: 23000	Volts de fase: 127.017
Corriente de fase: 1.087 A	Corriente de fase: 196.824 A
Conductor de alambre de cobre.	Conductor de aluminio, tipo lámina.
Calibre del conductor: 21 AWG	Ancho del conductor: 203.2 mm
Diámetro del conductor: 0.724 mm	Espesor del conductor: 0.762 mm
Diámetro con aislamiento: 0.79 mm	Espesor con aislamiento: 0.762 mm
Área del conductor: 0.4105 mm^2	Área del conductor: 154.8384 mm^2
Densidad del conductor: 2.65 A/mm^2	Densidad del conductor: 1.271 A/mm^2
Vueltas por columna: 3422	Vueltas por columna: 18
Bobinas: 1	Bobinas: 1
Vueltas por bobina: 3422	Vueltas por bobina: 18
Capas: 14	Capas: 18
Vueltas por capa: 245	Vueltas por capa: 1
Conductores en paralelo: 1	Conductores en paralelo: 1
Ductos parciales: 2	Ductos parciales: 1
Altura radial: 18.06 mm	Altura radial: 15.88 mm
Altura axial: 195 mm	Altura axial: 203.2 mm
Tolerancia axial: 195 mm	Tolerancia axial: 2 mm
Altura conductor: 194.21 mm	Altura conductor: 204.2 mm
Cabezal bobina: 58 mm	Cabezal bobina: 48 mm
Altura de bobina: 253 mm	Altura de bobina: 253 mm
Carpeta cabezal-yugo: 12 mm	Carpeta cabezal-yugo: 12 mm
kV Impulso: 150	kV Impulso: 30
kV Aplicado: 50	kV Aplicado: 10
kV Inducido: 48.3	kV Inducido: 0.44
Volts/vuelta: 7.0565	Volts/vuelta: 7.0565
Peso: 34.8 kg	Peso: 16.2 kg

4.4. Diseño de Aislamientos

Los aislamientos de las bobinas del prototipo son fabricados con papel insuldur diamantado, tipo DPP_TU, de 0.127 mm de espesor, fabricado por Krempel Group. El papel tiene las siguientes características:

Propiedades del Aislamiento de Papel

Propiedades	Unidad	Procedimiento de prueba	Valores requeridos	Resultado del lote de fabricación:
Espesor papel y resina	mm	DIN 7734	0.165 ± 0.02	0.147
Espesor del papel	mm	DIN 7734	0.125 ± 0.015	0.123
Peso base	g/m^2	DIN 7734	150 ± 23	139
Capa de resina	µm	DIN 7734	20 ± 10	12
Voltaje de ruptura	kV	DIN 7734	>/= 1.2	1.8

4.5. Cálculo del Peso del Transformador

El peso total aproximado de un transformador toma en cuenta las diversas estructuras y materiales que lo conforman, como el núcleo, las bobinas, los herrajes, el tanque, los accesorios y el aceite, en un transformador enfriado con aceite, de circulación natural. A continuación, se presenta el peso aproximado de las partes que conforman al prototipo de transformador:

Peso Aproximado del Prototipo de Transformador

Partes	Peso
Núcleo, bobinas y herrajes	295 kg
Tanque y accesorios	115 kg
151 lts de aceite	136 kg
Total	546 kg

5. Ingeniería de Detalle

Los siguientes diseños se presentan en el siguiente orden, al final del documento:

1. Diseño de Moldes para Núcleo
2. Diseño del Bastidor
3. Diseño de Partes para Tanque
4. Diseño de Cubierta
5. Diseño de Tanque y Accesorios
6. Desarrollo de la Parte Mecánica del Transformador

6. Cálculo de Enfriamiento del Transformador

El transformador tiene aceite como medio refrigerante. Es del tipo OA, en el cual, el enfriamiento se obtiene con la circulación natural del aceite en el dispositivo. El transformador tiene los siguientes datos, con respecto a sus características térmicas.

Características Térmicas del Transformador

Watts obtenidos en la prueba de temperatura	1150
Elevación total de temperatura	65 °C
Gradiente máximo	6.57 °C
Corrección por altitud	2 °C
Elevación del líquido	54.43 °C
Altitud msnm	23000 m
Perímetro total envolvente	2.564 m
Superficie de radiación de la envolvente del transformador	1.282 m^2
Superficie de convección del tanque	1.436 m^2
Superficie de radiación del tanque	1.436 m^2
Watts (radiación+convección) del transformador	1634
Margen de tolerancia	485 W

Se tienen los siguientes datos del tanque:

Datos del Tanque del Transformador

Largo	0.86 m
Ancho	0.42 m
Altura del aceite, a 25 °C	0.56 m
Watts que disipa el tanque, por radiación	614
Watts que disipa el tanque, por convección	710
Watts totales que disipa el tanque	1324

La cantidad de watts que disipa el tanque es mayor que la cantidad de watts obtenidos con la prueba de temperatura, por lo que no son necesarios radiadores para disipar el calor generado en el transformador.

7. Cálculo de Corto Circuito

El corto circuito es una de las situaciones más críticas que debe resistir el transformador, ya que produce corrientes de gran magnitud en las bobinas. Las corrientes de corto circuito generan esfuerzos internos en el transformador, los cuales pueden provocarle daños severos. La corriente simétrica de corto circuito del diseño del transformador con núcleo de acero amorfo es:

$$I_{CC} = 8033.63 \text{ A}$$

La corriente asimétrica I_{CC_AS} es la corriente, en valor pico, que se presenta durante los primeros ciclos en los que ocurre el cortocircuito, la cual debe ser soportada por el transformador. La corriente asimétrica de corto circuito del diseño es:

$$I_{CC_AS} = 8033.63 \text{ A}$$

Durante el corto circuito, se presentan esfuerzos en las bobinas del transformador, debidas a los flujos magnéticos generados. Los esfuerzos se dividen en axiales y radiales.

Los esfuerzos axiales (verticales) provocan la tendencia de las bobinas de desplazarse verticalmente, hacia arriba las de baja tensión y hacia abajo las de media

tensión. Las uniones de papel entre las diferentes capas de las bobinas y el espacio que las separa limitan los esfuerzos axiales, en condiciones de corto circuito.

Los esfuerzos radiales (horizontales) someten a los conductores de la bobina exterior a tensiones circunferenciales, que provocan que la bobina se expanda hacia afuera del núcleo. La bobina interior es sometida a fuerzas de compresión hacia el núcleo.

Los esfuerzos verticales se denotan con FSV, cuyo límite sobre la vuelta media del espacio alta-baja es 20 lb/plg^2, según pruebas realizadas por la compañía Westinghouse. El valor máximo de FSV, en kg/cm^2, es el siguiente:

$$FSV_{max} = 1.41 \text{ kg/cm}^2$$

Los esfuerzos horizontales se denotan con FSH, cuyo límite es 250 lb/plg^2, según pruebas realizadas por la compañía Westinghouse. El valor máximo de FSH, en kg/cm^2, es el siguiente:

$$FSH_{max} = 17.58 \text{ kg/cm}^2$$

El diseño del transformador con núcleo de acero amorfo presentó los siguientes valores, con respecto a los esfuerzos calculados:

$$FSV = 0.86 \text{ kg/cm}^2$$

$$FSH = 8.22 \text{ kg/cm}^2$$

Los valores anteriores se encuentran dentro de los límites establecidos.

Otro esfuerzo presentado en las bobinas durante el cortocircuito es el esfuerzo circunferencial, de la primera capa interior de la bobina exterior, denotado por ST_i, que provoca que el conductor se encuentre en tensión. Se considera a la capa interior como un anillo de pared delgada, sometido a una presión interna uniforme. El límite para el esfuerzo circunferencial de la bobina exterior es igual a 2100 lb/plg^2 para conductores cilíndricos, como el empleado para el prototipo. El valor máximo de ST_i, en kg/cm^2, es el siguiente:

$$ST_{imax} = 147.645 \text{ kg/cm}^2$$

El esfuerzo circunferencial de la primera capa exterior de la bobina interior, denotado por ST_e, provoca que el conductor de la primera vuelta de la bobina se encuentre en tensión. Se considera a la vuelta exterior de la bobina como un anillo de pared delgada, sometido a una presión externa uniforme. El límite para el esfuerzo

circunferencial de la bobina interior es igual a 2400 lb/plg^2, para conductores tipo lámina, como el empleado para el prototipo. El valor máximo de ST_e, en kg/cm^2, es el siguiente:

$$ST_{emax} = 168.74 \text{ kg/cm}^2$$

Las bobinas del transformador de núcleo de acero amorfo presentan los siguientes esfuerzos circunferenciales:

$$ST_e = 73.89 \text{ kg/cm}^2$$

$$ST_i = 36.44 \text{ kg/cm}^2$$

Los valores anteriores se encuentran dentro de los límites establecidos.

El esfuerzo radial de delaminación del papel rómbico es la resistencia a la tensión de los papeles pegados entre los conductores, en el espacio de baja-media tensión, el cual tiende a separar a las bobinas durante el corto circuito. En la bobina interior, el esfuerzo máximo radial que tiende a separar a la bobina del espacio baja-media es igual a 11 lb/plg^2, y se denota por p_e. El máximo esfuerzo que tiende a separar a la bobina externa también es igual 11 lb/plg^2, y se denota por p_i. El límite del esfuerzo radial, en kg/cm^2, en es el siguiente:

$$p_{imax} = p_{emax} = 0.77 \text{ kg/cm}^2$$

Los esfuerzos radiales de delaminación, obtenidos en el diseño con núcleo de acero amorfo, son los siguientes:

$$p_e = 0.6 \text{ kg/cm}^2$$

$$p_i = 0.41 \text{ kg/cm}^2$$

Los esfuerzos radiales de delaminación, de las bobinas del diseño con núcleo de acero amorfo se encuentran dentro de los límites establecidos.

Además de los esfuerzos mecánicos, las corrientes de corto circuito generan una alta elevación de temperatura en las bobinas, con respecto a la temperatura que se presenta en condiciones normales de operación. La bobina de baja tensión presenta la siguiente temperatura, calculada en base a IEC 60076-5 para conductores de aluminio, considerando que el corto circuito dura un tiempo *t* igual a 0.75 segundos, según NMX-J-116-ANCE-2005:

$$T = 135.5 \text{ °C}$$

El valor máximo de temperatura que puede soportar una bobina de aluminio, sin sufrir un deterioro considerable, es 200 °C, según IEEE Std C57.12.00-1993, con lo que la bobina de baja tensión del prototipo cumple con el límite establecido.

Con respecto a la bobina de media tensión, se tiene la siguiente temperatura después del corto circuito, calculada en base a IEC 60076-5 para el cobre, en el tiempo usado para el cálculo de la temperatura de la bobina de baja tensión:

$$T = 166.4\ °C$$

El valor máximo de temperatura de una bobina de cobre es 250 °C, según IEEE Std C57.12.00-1993, por lo que la bobina de media tensión del diseño propuesto cumple con el límite de temperatura, establecido para soportar el corto circuito.

8. Evaluación del Proyecto

El diseño de transformadores involucra asegurar la compatibilidad del diseño con las especificaciones impuestas por las normas, con respecto a la eficiencia y a las máximas pérdidas permitidas, al menor precio de manufactura posible.

Un criterio para la evaluación y optimización de un transformador es el costo evaluado, que se calcula con la expresión (8.1), el cual toma en cuenta el precio del transformador y los costos de las pérdidas que genera durante su vida útil. El costo evaluado del transformador (*CET*) es:

$$CET = P + PWV + PWC = P + CWV*WV + CWC*WC \tag{8.1}$$

Donde:

P	Precio del transformador, en $.
PWV	Costo watts vacío, en $.
PWC	Costo watts cobre, en $.
WV	Watts vacío, en W.
CWV	Costo del watt vacío, en $/W.
WC	Watts cobre, en W.
CWC	Costo del watt cobre, en $/W.

El prototipo del transformador con núcleo de acero amorfo tiene los siguientes datos, con respecto a su costo evaluado:

Costo Evaluado del Transformador con Núcleo de Acero Amorfo

Datos	Valor	Unidades
P	47,925	$
WV	69	W
CWV	89.89	$/W
PWV	6,202.41	$
WC	1,014	W
CWC	44.28	$/W
PWC	44,899.92	$
CET	99,027.33	$

Dentro del precio del transformador se incluye el costo del núcleo, que es fabricado por Lake View Metals Inc., empresa dedicada a la construcción de núcleos de acero amorfo. Un transformador, con la misma capacidad nominal y tensiones nominales del prototipo presentado y con núcleo de acero al silicio, tiene los siguientes valores con respecto a su costo evaluado:

Costo Evaluado del Transformador con Núcleo de Acero al Silicio

Datos	Valor	Unidades
P	49,800	$
WV	261	W
CWV	89.89	$/W
PWV	23,461.29	$
WC	753	W
CWC	44.28	$/W
PWC	33,342.84	$
CET	106,604.13	$

10.Bibliografía

[1] NOM-002-SEDE-2010, *Requisitos de Seguridad y Eficiencia Energética para Transformadores de Distribución*, México 2010.

[2] Anteproyecto NOM-002-SEDE-2012, *Requisitos de Seguridad y Eficiencia Energética para Transformadores de Distribución*, México 2012.

[3] NMX-J-116-ANCE-2005, *Transformadores de Distribución Tipo Poste y Tipo Subestación-Especificaciones*, México 2005.

[4] IEEE Std C57.12.00-1993, *IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers,* 1993.

[5] IEC 60076-5:2000, *International Standard, Power Transformers-Part 5: Ability to Withstand Short Circuit,* 2000.

[6] Manual de Material Metglas Inc., *Amorphous Alloys for Transformer Cores,* EUA, Metglas Inc., pp. 1-26.

[7] J. C. Olivares-Galván, S. Magdaleno-Adame, E. Campero-Littlewood, R. Escarela- Pérez y P. S. Georgilakis, "Techno-economic evaluation of reduction of low-voltage bushings diameter in single-phase distribution transformers," *Electric Power Components and Systems*, vol. 39, no. 13, pp. 1388-1402, Agosto 2011.

[8] J. C. Olivares-Galván, P. S. Georgilakis y R. Ocón-Valdéz, "A review of transformer losses," *Electric Power Components and Systems*, vol. 37, no. 9, pp. 1046-1062, Septiembre 2009.

[9] E. I. Amoiralis, M. A. Tsili y A. G. Kladas, "Transformer design and optimization: a literature survey," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 4, pp. 1999-2024, Octubre 2009.

[10] E. I. Amoiralis, M. A. Tsili, P. S. Georgilakis y A. G. Kladas, "Energy efficient transformer selection implementing life cycle cost and environmental externalities," *9th International Conference. Electrical Power Quality and Utilization,* Barcelona, pp. 1-6, Octubre 2007.

[11] P. P. Geno, "Calculations for short circuit withstand capability of a distribution transformer," *International Journal of Advancements in Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 142-150, Enero 2011.

[12] R. Patiño-Ruiz, J. C. Olivares-Galván, E. Campero-Littlewood, M. S. Esparza-González, "Transformadores de distribución con núcleos de acero amorfo," *Conciencia Tecnológica*, no. 38, pp. 18-23, Diciembre 2009.

[13] P. Avelino-Pérez, *Transformadores de Distribución. Teoría, Cálculo, Construcción y Pruebas*, Editorial Reverté, tercera edición, México 2008.

[14] S. V. Kulkarni y S. A. Khaparde, *Transformer Engineering*, Marcel Dekker, 2004.