

Estudio de los Conductores Externos para Realizar la Prueba de Carga de un Transformador de 300 MVA

Salvador Magdaleno Adame, Juan C. Olivares Galván, Felipe de J. González Montañez, Gustavo I. Martínez Ruiz, Rodrigo Ocón Valdez, Eduardo Campero Littlewood

Resumen— Los conductores externos que se utilizan para realizar las pruebas de carga y de temperatura en transformadores los llamaremos conectores en este trabajo. Este artículo presenta los factores que hay que considerar para el diseño de conectores de potencia utilizados en las pruebas de temperatura y de carga en transformadores de potencia. Se realizó un estudio del comportamiento eléctrico y térmico de un conector de potencia para un transformador de potencia monofásico tipo acorazado de 300 MVA, $400/\sqrt{3}$ kV - 21.5 kV, con enfriamiento tipo FOA. Para analizar el comportamiento del conector primero se realizó un análisis armónico para calcular las pérdidas que se generan en el conector de potencia. Posteriormente se realizó un análisis de elemento finito térmico-estático para calcular la distribución de temperatura en el conector. En este análisis se usaron como fuentes de calor las pérdidas obtenidas en el análisis armónico. El resultado de la distribución de temperatura obtenido en la simulación de elemento finito fue comparado con la medición de temperatura obtenida con una cámara infrarroja durante la prueba real del transformador de potencia.

Temas claves— Prueba de Carga, Prueba de temperatura, Área de contacto, Resistencia de contacto, Elemento finito, Conector de potencia.

I. INTRODUCCIÓN

El transformador potencia es un elemento de suma importancia dentro de un sistema eléctrico de potencia, de una empresa o de alguna subestación particular; es por eso que se busca un buen funcionamiento en ellos. Para lograr ello se les realizan diversas pruebas con el fin de determinar sus capacidades eléctricas, térmicas y mecánicas, también para determinar los parámetros de su circuito equivalente y así poder hacer un estudio de ellos dentro de un sistema [1], [2].

Entre las pruebas que se realizan a los transformadores se encuentran las pruebas de carga y de temperatura. La prueba de carga sirve para determinar las pérdidas del cobre del transformador; en esta prueba la tensión es aplicada del lado

de alta tensión mientras se miden la corriente y la potencia de entrada manteniendo las terminales de baja tensión en cortocircuito. La prueba de temperatura sirve para determinar el aumento de temperatura del transformador [3], [4]. La prueba de temperatura tiene un tiempo de duración de 12 horas. En esta prueba se aplica un voltaje menor al voltaje nominal en las terminales de alta tensión, para que se logre la circulación de la corriente nominal por el corto circuito localizado en las terminales de baja tensión del transformador (corriente nominal de baja tensión). Para poner en corto circuito las terminales de baja tensión del transformador se utiliza un conector de potencia, por el cual circulan altas corrientes (10 kA a 32 kA). Un conector de potencia está formado por soleras grandes y pesadas de material conductor, que puede ser cobre o aluminio. Estas soleras se ensamblan junto con su tornillería de acero inoxidable no magnético para evitar puntos calientes [5]-[7] y formar un cuerpo conductor sólido que permite poner en corto circuito los adaptadores de las boquillas de baja tensión.

El diseño apropiado del conector evita que durante las pruebas existan altas pérdidas por efecto Joule y por lo tanto altas temperaturas. De [8]-[15] se discuten los diversos factores que afectan el desempeño de una buena o mala conexión de materiales conductores, así como las medidas paliativas que deben ser tomadas cuando se escogen materiales conductores para conectores eléctricos. Actualmente no se ha encontrado ningún tipo de estudio sobre conectores de potencia usados en las pruebas del transformador. No se tiene información sobre su diseño, construcción, efectos electromagnéticos, efectos térmicos, fallas, costos, etc.

En este artículo se muestran los principales factores que hay que considerar para el diseño de conectores de potencia. Para seleccionar el material conductor del conector se deben considerar sus propiedades mecánicas, eléctricas, térmicas, químicas, etc.

La propiedad eléctrica de los materiales usados en los conectores es muy importante debido al efecto del contacto eléctrico. El contacto eléctrico entre piezas de material conductor se debe al tamaño y el acabado de la superficie donde se involucra: el área de contacto eléctrico y la fuerza con que se realiza la conexión. Otro factor a considerar para el diseño es el tipo de conexión que se realizara, en las pruebas a transformadores se tiene uniones atornilladas con tornillería de acero inoxidable no magnético donde se debe de considerar el par de apriete de los tonillos para tener una buena conexión sin tener aumentos de temperatura en las zonas de las uniones y

Salvador Magdaleno Adame esta con el Instituto Tecnológico de Morelia, 58120, Morelia, MEX (e-mail: smagdaleno@hotmail.com).

Juan C. Olivares Galván, Felipe de J. González Montañez y Eduardo Campero Littlewood están con Universidad Autónoma Metropolitana, 02200, México D.F., MEX (e-mail: jolivares@correo.azc.uam.mx).

Gustavo I. Martínez Ruiz está con el Instituto Politécnico Nacional-ESIME Unidad Zacatenco, 07738, México D.F., MEX (e-mail: bobgustavo_11@hotmail.com).

Rodrigo Ocón Valdez esta con Industrias IEM S.A. de C.V., 54010, Tlalnepantla, Edo. de México, MEX (e-mail: rocon@condumex.com.mx).

tornillos.

Una forma de revisar que alguna conexión esté funcionando de manera correcta es monitoreando su temperatura, ya que temperaturas mayores a las esperadas nos indicara un problema en la conexión.

En este artículo se presenta un estudio de un conector de potencia usado durante la prueba de carga, de un transformador de potencia monofásico del tipo acorazado de 300 MVA. Se realizó un estudio armónico donde se calcularon las pérdidas en el conector de potencia y posteriormente se realizó un estudio térmico-estático para calcular las temperaturas en el conector de potencia.

El fabricante de los transformadores espera que durante la prueba real del transformador, los conectores tengan temperaturas menores a 90°C. No se desea tener temperaturas mayores a 90°C por sobrecalentamiento de las partes cercanas al conector, como lo son: las boquillas de porcelana de baja tensión, pared del tanque, empaques, aceite dieléctrico.

Además en el diseño del conector se debe considerar una fácil desconexión del mismo, esto debido a que se requiere desconectarlo en menos de 60 segundos al final de la prueba de temperatura, ya que al término de la prueba se realizan los cortes de temperatura por lo que no se tiene que dejar enfriar el transformador por mucho tiempo.

II. CONSIDERACIONES PARA UN CONECTOR DE POTENCIA

Un buen diseño garantizara que las pruebas al transformador sean fiables. Para el diseño de un conector de potencia se deben considerar varios factores: material del conector, superficie y área de contacto y los tipos de conexiones. Enseguida se da una breve explicación de cada uno de estos factores.

A. Material del Conector

Los conductores más utilizados no sólo para conectores si no para cualquier elemento eléctrico son el cobre y el aluminio [8]-[15]. Se utilizan estos conductores porque tienen muchas ventajas en relación a los demás como sus propiedades químicas, térmicas y eléctricas, su disponibilidad y su costo. Lo más recomendable para este tipo de conexiones es que el conector debe ser del mismo material de los conductores que se van a unir, ya que, obviamente, esto elimina la corrosión galvánica.

B. Superficie y Área de Contacto

Se establece en [11] que para que el conector tenga un buen funcionamiento es indispensable que la zona de contacto sea lo suficientemente grande ya que como se ve en Fig. 1, la corriente sólo pasa por los puntos de contacto que se logran formar cuando se realiza la conexión, por lo que el área real de contacto se reduce. A medida que aumenta la fuerza de contacto la superficie de estos puntos de contacto metal-metal se incrementará como consecuencia de la ruptura de la capa de óxido y la extrusión del metal a través de las rupturas. Sin embargo hay que tener en cuenta que con una fuerza muy grande pueden cambiar las propiedades de los materiales y

puede traer como consecuencia el aumento de temperatura y de su resistencia.

C. Tipo de Conexiones

En los conectores se utilizan las uniones atornilladas, ya que son versátiles, fiables, económicas y fáciles de montar y desmontar. Para las conexiones atornilladas se debe revisar el par de apriete de los tornillos, en los conectores estos deben ser apretados con una llave de torsión al par adecuado, ya que si se les da un par menor, la unión no será buena y con un par mayor la temperatura del contacto aumentara.

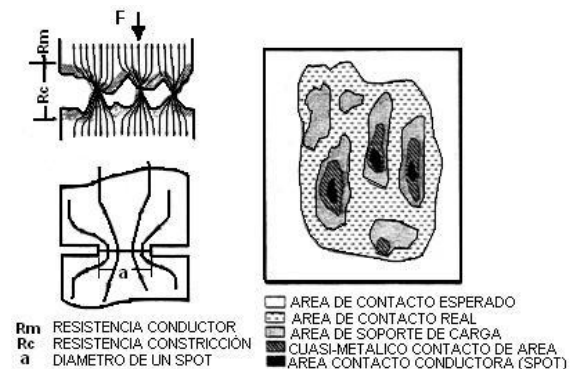


Fig. 1. Esquemización del área real de la superficie de contacto (derechos de autor © 2002 IEEE [11], reimpresso con permiso).

III. SIMULACIONES DE ELEMENTO FINITO DEL CONECTOR DE POTENCIA

Se realizó un estudio del comportamiento eléctrico y térmico de un conector de potencia para un transformador de potencia monofásico tipo acorazado de 300 MVA, 400/√3 kV - 21.5 kV, con enfriamiento tipo FOA. Se realizó un análisis armónico del conector de potencia a una frecuencia de 60 Hz usando el programa Maxwell ANSYS®. En este análisis no se tomaron en cuenta las boquillas de porcelana del transformador y tampoco sus adaptadores de cobre. Además, no se tomó en cuenta los tornillos que unen las soleras de los conectores y tampoco se tomaron en cuenta las prensas que aprietan las soleras.

Las soleras que forman el conector de potencia están hechas de cobre con una conductividad $\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m, este valor fue tomado de la librería de Maxwell ANSYS®.

La corriente pico I del lado de baja tensión (21.5 kV) del transformador se calculó como:

$$I = (\sqrt{2}) \left(\frac{S}{V} \right) = (\sqrt{2}) \left(\frac{300 \text{ MVA}}{21.5 \text{ kV}} \right) = 19.73 \text{ kA} \quad (1)$$

El conector de potencia del transformador tiene 8 terminales de cobre en cada uno de sus extremos debido a que cada una de las boquillas de baja tensión del transformador también tiene 8 adaptadores de cobre, por lo que la corriente pico calculada en (1) se divide entre 8. Una corriente pico de 2.47 kA se inyecta en cada una de las terminales del conector de potencia como se muestra en la Fig. 2.

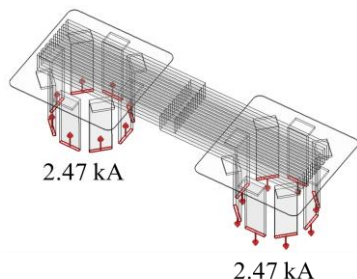


Fig. 2. Condición de carga del conector del transformador de 300 MVA.

El modelo del conector fue encerrado en un rectángulo de aire cuya permeabilidad es $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m. En las caras exteriores del rectángulo se colocó una frontera de Dirichlet. En la Fig. 3 se muestra el conector encerrado en el rectángulo de aire.

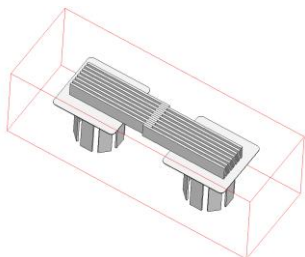


Fig. 3. Rectángulo de aire que encierra el modelo del conector de potencia.

En Fig. 4 se muestra la malla de elementos finitos usada en el conector de potencia.

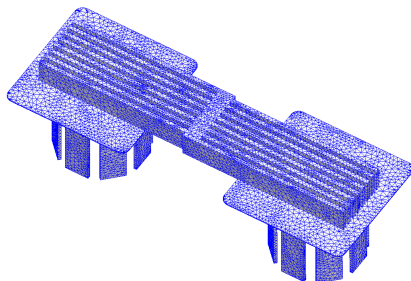


Fig. 4. Malla de elementos finitos del conector.

Se usaron en total 270,293 elementos finitos piramidales en todo el modelo. Se trató de hacer una malla fina en cada una de las soleras del conector para tomar en cuenta el factor de efecto piel δ que para el cobre a una frecuencia de 60 Hz es de 8.53 mm.

En Fig. 5 se muestra la distribución de pérdidas en W/m^3 obtenidas en el conector del transformador de 300MVA.

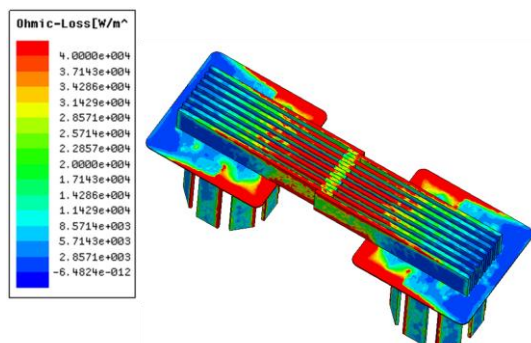


Fig. 5. Distribución de pérdidas en W/m^3 .

Se puede ver que existe una máxima pérdida de $4 \times 10^4 W/m^3$ en las soleras del conector justo antes de la zona de contacto. Además en la zona de contacto de las soleras existe una baja pérdida de $2 \times 10^4 W/m^3$. Existen menos pérdidas en W/m^3 en la zona de contacto debido a la baja densidad de corriente en la zona y debido a la alta resistencia de dicha zona de contacto.

Posteriormente se calcularon las pérdidas en W en cada una de las soleras del conector de potencia. La pérdida P en cada solera del conector fue calculada usando [16]:

$$P = \int_V \frac{J \cdot J^*}{2\sigma} dV \quad (2)$$

donde J es la densidad de corriente, J^* es el complejo conjugado de la densidad de corriente, σ es la conductividad del cobre y V es el volumen de cada solera del conector de potencia [16]. Aplicando (2) a todas las soleras del conector se obtuvo una pérdida total de 1.098 kW.

Las pérdidas obtenidas en W/m^3 en cada una de las soleras del conector fueron usadas como fuentes de calor para el análisis de temperatura.

Se realizó la simulación térmico-estática del conector de potencia usando el programa Comsol Multiphysics® y su módulo de transferencia de calor en 3D.

En estas simulaciones se siguió considerando que las soleras de los conectores son de cobre con una conductividad térmica $k = 400 W/m^2K$, con una densidad de $\rho = 8700 kg/m^3$ y con un calor específico $c = 385 J/kg^2K$. Estas propiedades térmicas del cobre fueron tomadas de la librería de materiales de Comsol Multiphysics®.

Además, en esta simulación se aplicó a todas las caras de las soleras del conector una frontera de convección. Este tipo de frontera de convección fue aplicada para simular el efecto del enfriamiento del aire por convección natural. A esta frontera se le asigna un coeficiente de convección h y una temperatura ambiente T_{amb} . En las dos soleras grandes cuadradas situadas en los extremos del conector se aplicó un coeficiente de convección mayor que el coeficientes de las demás soleras debido a que estas soleras disipan mejor el calor debido a que tienen más área de contacto con el aire que circula a su alrededor.

En Tabla I se muestra los valores tomados para dicha frontera de convección para el conector de potencia.

TABLA I. Valores de la frontera de convección

Soleras de conector	h ($W/m^2^{\circ}C$)	T_{amb} ($^{\circ}C$)
2 soleras grandes cuadradas	11	25
Todas las demás soleras	0.05	25

En [17] los valores de h usados para la convección natural del aire van de 2 a 25 $W/m^2^{\circ}C$. Valores menores a $h = 2 W/m^2^{\circ}C$ se pueden considerar como coeficientes de convección natural.

En Fig. 6 se muestra la distribución de temperatura del conector. La máxima temperatura se encuentra alrededor de

las largas soleras centrales del conector donde la temperatura promedio esta en alrededor de 74°C. Debido a las corrientes de remolino la temperatura más alta se localiza alrededor de las soleras como lo muestra el resultado de la simulación de elemento finito. Además, se puede ver que existe una alta temperatura en la zona de contacto donde se realizan las uniones de todas las soleras de cobre. En esta zona se presenta una temperatura máxima de 79°C. Es justo aquí donde se esperaba la mayor temperatura, ya que es donde se tiene la mayoría de las uniones lo que hace que la resistencia aumente y por lo tanto que la temperatura aumente. En las grandes soleras cuadradas se encontró una temperatura promedio de 68°C.

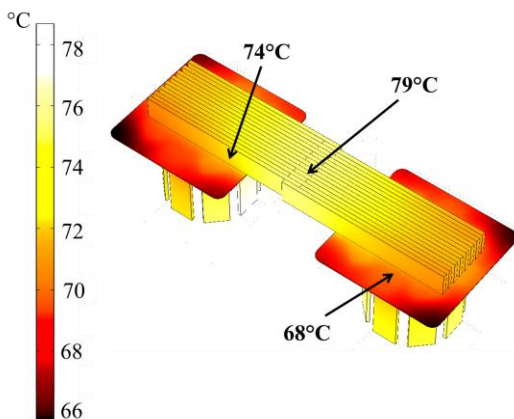


Fig. 6. Distribución de temperatura del conector.

En Fig. 7 se muestran la imagen obtenida con la cámara infrarroja para el conector durante la prueba real del transformador de 300 MVA.

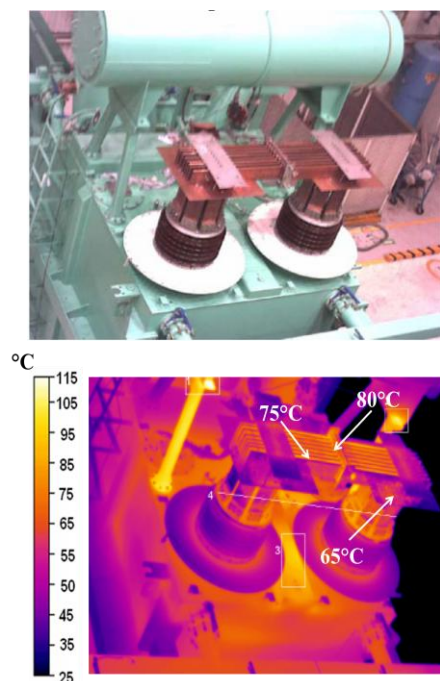


Fig. 7. Distribución de temperatura del conector obtenida con la cámara infrarroja.

Se puede ver que las temperaturas obtenidas en la simulación de elemento finito son muy cercanas a las

temperaturas obtenidas con la cámara infrarroja. Los porcentajes de error entre los valores de temperatura medidos durante la prueba real del transformador y los obtenidos en la simulación de elemento finito son menores al 5%. Quiere decir, que la simulación de elemento finito da una buena aproximación del comportamiento real del conector de potencia durante la prueba del transformador.

IV. CONCLUSIONES

Se realizó un estudio eléctrico y térmico de un conector de potencia usado en las pruebas de carga y de temperatura de un transformador monofásico tipo acorazado de 300 MVA. Los resultados obtenidos de las simulaciones por el método de elemento finito y mediciones reales son aceptables desde el punto de vista de ingeniería: las temperaturas obtenidas son menores a los 90°C como lo deseaba el fabricante de transformadores.

Se obtuvieron buenos resultados usando la simulación de elemento finito y la distribución de temperatura obtenida con la cámara infrarroja durante la prueba real del transformador. Los porcentajes de error entre los valores de temperatura medidos durante la prueba del transformador y los obtenidos en la simulación de elemento finito fueron menores al 5%.

En este artículo se mostraron los factores que hay que considerar para el diseño de conectores de potencia. Se propone como trabajo futuro: comparar las ventajas y las desventajas de fabricar los conectores de potencia con soleras y con conductores trenzados, utilizando tanto cobre como aluminio. Así como aplicar la metodología a un rango más amplio de capacidades de transformadores de potencia.

V. REFERENCIAS

- [1] S.V. Kulkarni and S.A. Khaparde, *Transformer Engineering: Design and Practice*, Marcel Dekker, USA, 2004.
- [2] P. S. Georgilakis, *Spotlight on Modern Transformer Design*. Springer, UK, 2009.
- [3] IEEE Standard for Standard General, "Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers," IEEE Standard C57.12.00-2006.
- [4] H. Nordman and M. Lahtinen, "Thermal overload tests on a 400-MVA power transformer with a special 2.5-pu short time loading capability," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 18, No. 1, Jan. 2003.
- [5] A. G. Estrada-Chablé, Juan C. Olivares-Galván, E. Campero-Littlewood, Salvador Magdaleno-Adame, R. Escarela-Pérez, and R. Ocón Valdez, "Analysis of hot-spots on power transformers covers," *ALTAE 2011*, La Habana, Cuba, 2011.
- [6] Y. Junyou, T. Renyuan, W. Chengyuan, Z. Meiwen, and C. Yongbin, "New preventive measures against stray field of heavy current carrying conductors," *IEEE Transactions on Magnetics*, May 1996, Volume: 32, Issue: 3, Part 1, pp. 1489-1492.
- [7] J. Turowski, "Overheating hazard in flanged bolt joints of transformers," in *Proc. Int. Symp. Electromagn. Fields in Elec. Eng., ISEF '85*, paper No. 63, pp. 271-274, Warsaw, Poland, 1985.
- [8] J. Aronstein and T. K. Hare, "AC and DC electromigration failure of aluminum contact junctions," *IEEE Trans. Components and Packaging Technologies*, Vol. 28, No. 4, pp. 701-709, Dec. 2005.
- [9] M. Runde, H. Jensvold, and M. Jochim, "Compression connectors for stranded aluminum power conductors," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 19, pp. 933-942, July 2004.
- [10] M. Braunovic, "Power connections," in *Electrical Contacts: Principles and Applications*, P. G. Slade, Ed. New York: Marcel Dekker, 1999,

- pp. 155–277.
- [11] M. Braunovic, "Effect of connection design on the contact resistance of high power overlapping bolted joints," *IEEE Trans. Components and Packaging Technologies*, Vol. 25, No. 4, pp. 642-650, Dec. 2002.
- [12] M. Braunovic, "Fretting damage in tin-plated aluminum and copper connectors," *IEEE Trans. Components, Hybrids and Manufacturing Technology*, Vol. 12, No. 2, pp. 215-223, June 1989.
- [13] R. Frank and C. Morton, "Comparative Corrosion and Current Burst Testing of Copper and Aluminum Electrical Power Connectors," Disponible en: <http://www.copper.org/applications/electrical/building/pdf/A6108.pdf>
- [14] Piet van Dijk, "Critical Aspects of Electrical Connector Contacts," Disponible en: <http://www.pvdijk.com/pdf/21thicecriticalaspects.pdf>
- [15] *Electrical Connections for Power Circuits*, Facilities Instructions, Standards, and Techniques FIST 3-3 11/91, August 2000.
- [16] Jose A. Rodriguez, "Computation of power losses by stray fluxes in power transformers utilizing the finite element method," (in Spanish) B.Sc. dissertation, UNAM, Mexico, 2008.
- [17] Frank P. Incropera and David P. DeWitt, *Introduction to Heat Transfer*, New York: John Wiley & Sons, 3th Edition, 1996.
- [18] S.W. Kim, H.H. Kim, S.C. Hahn, B.Y. Lee, K.Y. Park, Y.J. Shin, W.P. Song, J.B. Kim, and I.H. Shin, "Coupled finite-element-analytic technique for prediction of temperature rise in power apparatus," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 38, No. 2, pp. 921-924, March 2002.
- [19] Robert T. Coneybeer and W.Z. Black, "Steady-state and transient ampacity of bus bar," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 9, No. 4, pp. 1822-1829, Oct. 1994.
- [20] S. Magdaleno Adame, R. Ocon V., A. Rodriguez R, and A. Cancino Quiroz, "Analysis of stray flux in 3D and temperature distribution of shell-type transformers," (in Spanish), RVP-AI/2009-TRO-13, Acapulco, Guerrero, Mexico, July 2009.

CINVEZTAV zacatenco. Está interesado en el diseño, modelado y análisis de máquinas eléctricas y transformadores.

Rodrigo Ocón Valdez. Egresado de la Facultad de Estudios Profesionales Aragón U.N.A.M donde obtuvo el título de Ingeniero Mecánico-Electricista en 1995. Desde 1995 labora en el área de Ingeniería y desarrollo de Transformadores de Potencia de Industrias IEM, S.A de C.V. En el 2004 obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en la sección de estudios de posgrado del I.P.N y es profesor definitivo de Ingeniería en la Facultad de Estudios Superiores (FES) Aragón U.N.A.M.

Eduardo Campero Littlewood (México D.F., 1947). En 1969 obtuvo el grado de Ingeniero Mecánico Electricista de la Facultad de Ingeniería, UNAM. Trabajó en la industria hasta 1975, año en el que inició sus estudios de maestría en el Imperial College de la Universidad de Londres. En 1977 ingresó como profesor de tiempo completo en la Universidad Autónoma Metropolitana, donde es profesor Titular C desde 1991. Sus áreas de interés en investigación son máquinas eléctricas y uso eficiente de la energía. Actualmente realiza estudios de doctorado en la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

VI. BIOGRAFÍA

Salvador Magdaleno A. Nació en la Piedad Michoacán, México en el año de 1983. En 2008 obtuvo su Licenciatura en Ingeniería Eléctrica por parte de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en Morelia, México. Del 2003 al 2008 trabajo en investigación relacionada a campos electromagnéticos en transformadores toroidales y convencionales, incluyendo la aplicación de entrehierros virtuales a núcleos toroidales. De Septiembre de 2008 a Diciembre de 2010 trabajó en la Industria como Ingeniero en Investigación y Desarrollo (R&D) en el Departamento de Tecnología de Transformadores y Reactores de Potencia en Industrias IEM S.A. de C.V. Sus áreas de investigación incluyen cálculo de campos electromagnéticos usando el método de elemento finito y modelado de transformadores y reactores usando el principio de dualidad. En este momento se encuentra estudiando su Maestría en Ingeniería Eléctrica en el área de diseño de máquinas eléctricas y equipos eléctricos en el Instituto Tecnológico de Morelia. Actualmente, está interesado en las áreas de investigación sobre almacenamiento de energía eléctrica producida por rayos (lightning) y la transmisión de energía eléctrica inalámbrica.

Juan C. Olivares G. (Zamora, Mich., 1969). En 1993 obtuvo el grado de Ingeniero Electricista del Instituto Tecnológico de Morelia. En 1997 y 2004 obtuve el grado de maestro en ciencias y el de doctor en el Instituto Tecnológico de Morelia y CINVESTAV, unidad Guadalajara respectivamente. Trabajo durante ocho años en la industria como diseñador de transformadores de distribución. En 2004 ingresó como profesor en el Instituto Tecnológico de Zapopan y a partir de septiembre del 2007 es profesor de tiempo completo de la Universidad Autónoma Metropolitana. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (Nivel I) y Senior Member del IEEE.

Gustavo I. Martínez R. En el 2010 obtuvo el grado de Ingeniero Electricista de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. Está interesado en el diseño, modelado y análisis de máquinas eléctricas y transformadores.

Felipe de J. González M. (México, D.F., 1985) En 2009 obtuvo el grado de Ingeniero Electricista de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. En 2011 obtuvo el grado de maestro en ciencias en el