

Análisis de falla en los bornes cerámicos de un banco de transformación de potencia con capacidades de 75/75/25 MVA y Tensiones de 230/138/13.8 kV.

Ing. Arturo García Carrión
Oficina de Sistemas Mecánicos
Laboratorio de Pruebas de Equipos y Materiales (LAPEM)
Irapuato, Guanajuato, México
arturo.garcia@cfemex.mx

Mtra. Karla Martínez Juárez
Oficina de Mecánica y Materiales
Laboratorio de Pruebas de Equipos y Materiales (LAPEM)
Irapuato, Guanajuato, México
karla.martinez@cfemex.mx

Resumen— Posterior al evento de falla donde se fracturaron los bornes cerámicos del bus terciario en tres transformadores monofásicos de un banco de transformación nuevo, debido a un corto circuito entre las fases “B” y “C” provocado por una serpiente en el bus terciario, que lo dejó indisponible de manera indefinida; se llevó a cabo el análisis de falla para determinar la causa raíz y el mecanismo de fractura de los bornes cerámicos ya que el corto no debió haber provocado la falla mecánica en dichos bornes por las protecciones eléctricas con las que cuentan estos equipos. El trabajo fue desarrollado por la oficina de Sistemas Mecánicos en conjunto con la oficina de Mecánica y Materiales, ambas del LAPEM en colaboración con la Universidad de Guanajuato (UG).



Fig. 1. Transformador monofásico

Palabras Clave— *Análisis de falla, borne, bus terciario, material cerámico, modelado estructural de borne por método de elemento finito, clivaje.*

I. INTRODUCCIÓN

El diseño de bancos de transformación en la Comisión Federal de Electricidad (CFE) es un proceso maduro, donde se han llevado a cabo gran número de proyectos de construcción y puesta en servicio de subestaciones eléctricas utilizando diferentes tecnologías, con éxito, logrando mantener el suministro de energía eléctrica en México de manera continua. En el contexto de la industria eléctrica actual, la iniciativa privada ha participado en el diseño, construcción y puesta en servicio, teniendo nuevas propuestas de diseño, que en ocasiones, no han sido probadas en los diferentes escenarios a los que se pueden ver expuestos los equipos e instalaciones, por lo que en este caso, se conformó un equipo multidisciplinario para la determinación de la causa raíz de la falla ocurrida en un banco de transformación nuevo y con tecnología de punta, después de un corto circuito. La principal diferencia en el diseño aplicado en esta subestación es que el bus terciario tiene cimentaciones y estructuras de soporte para toda la trayectoria, mientras que el diseño empleado en la CFE considera estructuras de soporte ancladas en las mamparas que dividen a cada uno de los transformadores. En la Fig. 1 se presenta un transformador monofásico empleado en esta instalación.

II. METODOLOGIA DE DESARROLLO

Para realizar el análisis de falla, se establecieron las actividades indicadas en la Tabla I con el objetivo de determinar la causa o las causas por las que se fracturaron los bornes cerámicos.

TABLA I.- METODOLOGÍA DE DESARROLLO

Actividad	Descripción
1	Análisis de falla de los elementos mecánicos en el evento de disparo del banco de transformación.
2	Inspección visual del estado de los bornes y del acoplamiento del conductor rígido de la conexión al bus con el conector de expansión tipo FZ ¹ .
3	Inspección de las estructuras denominadas soporte de las barras del bus terciario
4	Inspección de los grados de libertad del conjunto de soporte de las barras del terciario-conductor de conexión al bus-conectores de expansión tipo FZ.
5	Condiciones de frontera aplicadas a los bornes
6	Determinación del mecanismo de falla en el material cerámico del borne
7	Obtención de las propiedades mecánicas del material cerámico
8	Obtención y validación de los esfuerzos por el método de elemento finito
9	Diagnóstico y acciones correctivas

¹ FZ es la designación del fabricante al tipo de conector de expansión empleado en la instalación.

III. ANÁLISIS DE FALLA DE LOS ELEMENTOS MECÁNICOS EN EL EVENTO DE DISPARO DEL BANCO DE TRANSFORMACIÓN

En la Fig. 2 se muestra una vista de planta de la configuración del banco de transformación y sus conexiones al bus terciario. También se indica donde ocurrió la falla eléctrica por el corto circuito generado por el puente entre las fases “B” y “C”, creado por una serpiente, generando el disparo de las tres fases.

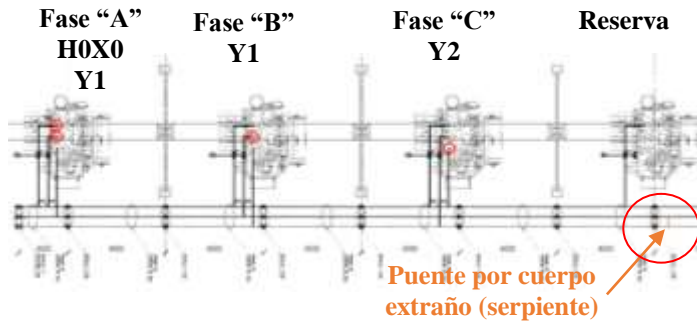


Fig. 2. Vistas de planta del banco de transformación, ubicación de bornes dañados.

A. Inspección visual del estado de borne

En la fotografía de la Fig. 3 se presenta el borne Y2 de la fase “C” como ejemplo, ya que todos los bornes fallados presentaron el mismo tipo de daño, encontrándose una fractura diagonal en la colindancia con el área de presión del sujetador ubicado debajo de la brida.

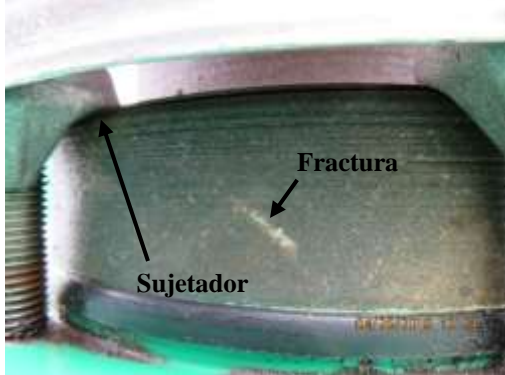


Fig. 3. Detalle de fractura en borne Y2 fase “C”.

B. Falta de rigidez en la estructura del soporte de las barras de terciario

La estructura de soporte en la parte alta presenta falta de rigidez, por lo que, durante el evento de corto circuito, la estructura oscila, y al no tener ningún componente que pudiera absorber o restringir el desplazamiento en la dirección de la oscilación, se transmitieron cargas adicionales a los bornes. En la Fig. 4 se presenta el arreglo de la estructura de soporte y se indica los elementos y la zona que presentó oscilación.

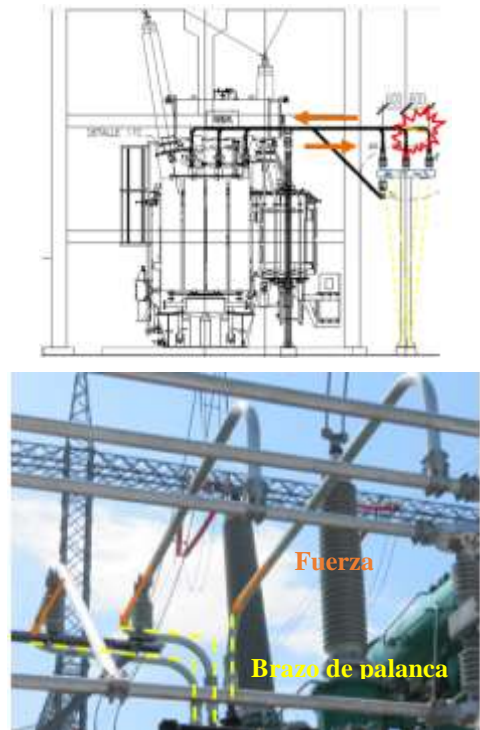


Fig. 4. Esquemas de oscilación en estructura soporte de barras de terciario

C. Deficiencias en el montaje de los conectores de expansión con el borne

En el diseño del borne, en la base, la sujeción es básicamente para trabajar a compresión en el sentido vertical, ya que el cuerpo está hecho de material cerámico (porcelana), el cual es de baja resistencia a esfuerzos de tensión, por lo que este componente es frágil. Durante la inspección, se observó que en el montaje había deficiencias en cuanto al acoplamiento del conector de expansión con el borne, ya que la conexión del bus terciario hacia los bornes del transformador se hizo por medio de conductores rígidos tubulares de una sola pieza, a los cuales se les requirió hacer ajustes en campo quedando diferente al ensamble de diseño tal como se muestra en la Fig. 5.



Fig. 5. Detalles de acoplamiento entre el conector FZ y el bus [Ref.3]

D. Concentración de esfuerzos

El diseño contempla la sujeción con la placa superior del tanque del transformador, por medio de seis opresores los cuales tienen contacto con el bisel de la base del cuerpo de porcelana, la fuerza de compresión se transmite a éstos a través de una brida por efecto del torque aplicado a las tuercas de los espárragos, como se muestra en la Fig. 6. Este diseño de sujeción es para contener el aceite dentro del tanque por medio de compresión del empaque. El área de contacto de los opresores es pequeña, si la boquilla se ve sometida a esfuerzos diferentes a los de compresión, estos opresores trabajarán como concentradores de esfuerzos. Nótese que la fractura proviene del área de contacto, lo cual es un común denominador en todos los bornes.

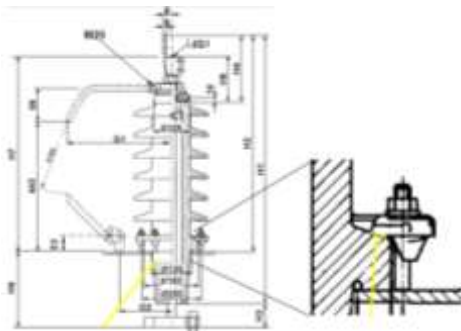


Fig. 6. Detalles de sujeción a compresión en base de borne [Ref.3]

E. Mecánica de fractura de materiales cerámicos

Los materiales cerámicos a diferencia de los metales son frágiles por lo que tienen alto riesgo de fractura súbita, ya que no se crea una zona de deformación plástica en el frente de la grieta, la fractura se producirá por clivaje (propiedad que presentan determinados minerales de dividirse fácilmente ante un efecto mecánico siguiendo unos planos determinados de debilidad) una vez alcanzada la tensión necesaria para la propagación de defectos internos. El diagrama esfuerzo-deformación de la Fig. 7 indica la diferencia entre una fractura en un material frágil y uno dúctil.

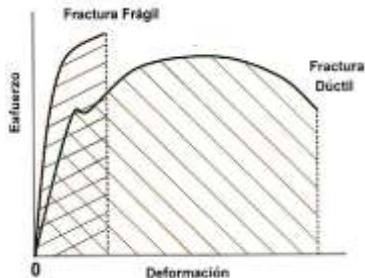


Fig. 7. Gráfica esfuerzo-deformación fractura frágil vs fractura dúctil

Conforme la grieta crece, intersecciona diferentes granos y fronteras de granos (hablando micro estructuralmente) con orientaciones distintas a la del plano de la grieta inicial, de forma que la tensión de la grieta necesaria para que ésta avance, crecerá gradualmente hasta que tenga un tamaño suficientemente grande.

Las fronteras de grano y las superficies de anisotropía son fuentes de debilitamiento, por lo que estos serán caminos preferentes para el avance de la grieta, produciéndose la propagación de la grieta en estos planos de clivaje fácilmente, o a lo largo de las fronteras de grano (ver Fig. 8). Al llegar a otro grano deberá producirse un cambio, al menos parcial, en la dirección de avance de la grieta, ya que los granos tienen distintas orientaciones, dando como resultado una rugosidad en la superficie de la fractura proporcional al grado de desviación de la grieta. [Ref.2]

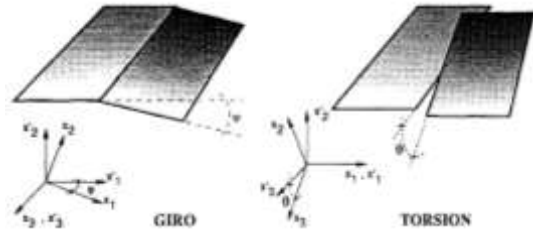


Fig. 8. Trayectoria de fractura entre frontera de grano

Los escalones de clivaje (ver Fig. 9) se pueden formar en la intersección de la grieta de clivaje. Este tipo de fallas es de alta velocidad de crecimiento y se requiere baja energía para formar la fractura frágil [Ref.2].

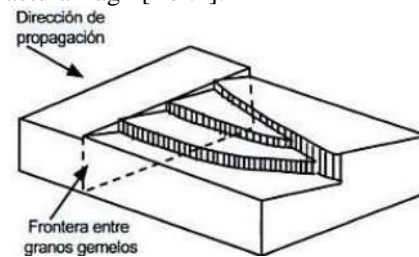


Fig. 9. Escalones de clivaje

F. Caracterización del material cerámico

Para obtener las propiedades mecánicas del material cerámico del borne, se realizó la prueba de tensión de tres puntos con una velocidad de carga de 1mm/s en una probeta de 60mm x 30mm x 15mm. [Ref.4]. La Fig. 10 muestra el equipo empleado para la prueba de tensión.



Fig. 10. Prueba de resistencia a la tensión del cerámico

Los resultados de la prueba de tensión se presentan en la Tabla II.

TABLA II. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL CERÁMICO DEL BORNE Y CONDICIONES DE FRONTERA

Propiedad mecánica (Condición de frontera)	Valor
Módulo de Young	2.03×10^5 Pa
Módulo de Poisson	0.23
Esfuerzo permisible a tensión	110.98×10^6 Pa
Módulo de ruptura	87.876×10^6 Pa
Presión para vencer presión interna de transformador	70×10^3 Pa
Gravedad estandar en la tierra	9.8066 m/s ²

En la caracterización mediante MEB-EDX de la zona donde ocurre la fractura, se detecta en su composición, un porcentaje de masa de cobre de aproximadamente 50%, así como elementos que comprenden al material cerámico. [Ref.4]. La Fig. 11 es una fotografiarí del recubrimiento en el borne cerámico. La Tabla III indica los elementos y el porcentaje en masa determinado durante la caracterización del material.

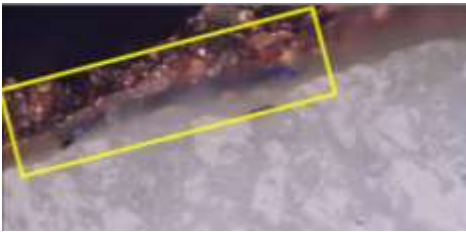


Fig. 11. Detalle de recubrimiento base cobre en borne cerámico

TABLA III.- ELEMENTOS QUÍMICOS PRESENTES EN EL BORNE

Elemento	% Masa
Cobre	49.7
Carbono	31.7
Oxígeno	13.5
Silicio	1.6
Aluminio	1.4
Cloro	0.6
Hierro	0.6
Calcio	0.4
Azufre	0.3
Potasio	0.2
Total	100

Como los materiales cerámicos contienen al menos dos tipos de iones, se generan defectos de cada tipo de ion. Además de materiales diferentes como en este caso es un metal (cobre) que se observa en la superficie del cerámico, los cuales tienen, por ende, propiedades diferentes y como se menciona anteriormente defectos diferentes.

El crecimiento de las grietas ocurre a través de los granos y a lo largo de determinados planos cristalográficos (planos de clivaje) los cuales son de alta densidad atómica.

La porosidad puede eliminarse con tratamientos térmicos, sin embargo, siempre queda porosidad remanente. La porosidad deteriora las propiedades mecánicas

La porosidad deteriora la resistencia a la flexión:

- Los poros reducen el área de la sección transversal a través de la cual se aplica la carga.

- Actúan como concentradores de esfuerzos

G. Modelado por elemento finito

Se desarrolló un modelo por elemento finito del borne para comprobar la concentración de esfuerzos y visualizar el comportamiento de la parte cerámica cuando se le aplican cargas, sometiendo a la pieza a esfuerzos diferentes a los de compresión. El análisis fue estático con una aplicación de carga, simulando la transferencia de fuerza a través del bus. Se logró replicar la zona de falla. [Ref.6]. Como se muestra en la Fig. 12.

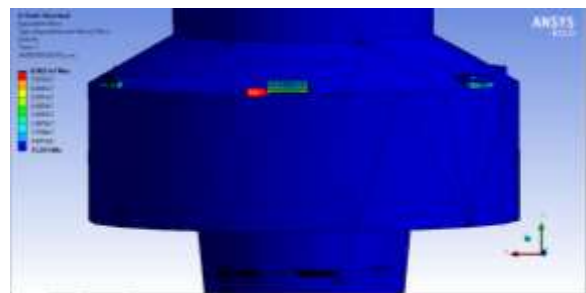
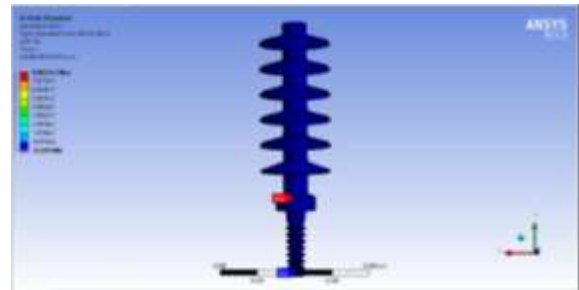
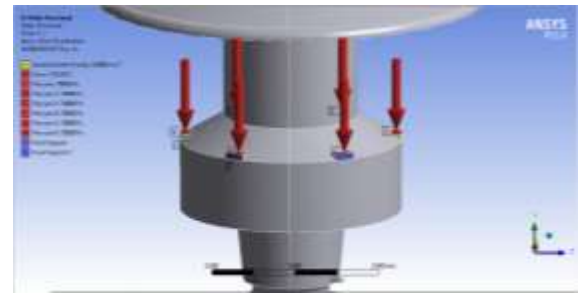
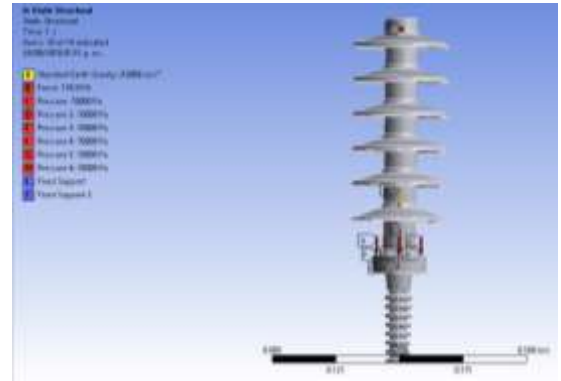


Fig. 12. Zona de esfuerzos máximos

H. Análisis de resultados

Mediante el modelo por elemento finito y empleando los datos obtenidos en la caracterización del material de las boquillas, se determinó que el material falla con la aplicación de la carga de 176.58N (18kg) en el eje “Z” generando esfuerzos de combinados de tensión y flexión en la zona de sujeción. Para obtener el factor de seguridad, se utilizó el módulo de ruptura de 87.876×10^6 Pa. La Tabla IV presenta las cargas aplicadas al modelo y los valores de esfuerzos y factor de seguridad obtenidos en el análisis; mismos que se presentan gráficamente en las Fig. 13 y Fig. 14, respectivamente.

TABLA IV.- RESULTADOS DE ESFUERZOS A DIFERENTES CARGAS APLICADAS

Carga (kg)	Newtons (N)	Esfuerzo Max (MPa)	Factor de seguridad (n)
1	9.81	7.48	11.75
2	19.62	12.28	7.16
3	29.43	17.07	5.15
4	39.24	21.87	4.02
5	49.05	26.66	3.30
6	58.86	31.46	2.79
7	68.67	36.26	2.42
8	78.48	41.05	2.14
9	88.29	45.85	1.92
10	98.1	50.65	1.73
11	107.91	55.44	1.59
12	117.72	60.24	1.46
13	127.53	65.04	1.35
14	137.34	69.83	1.26
15	147.15	74.46	1.18
16	156.96	79.43	1.11
17	166.77	84.23	1.04
18	176.58	89.07	0.99

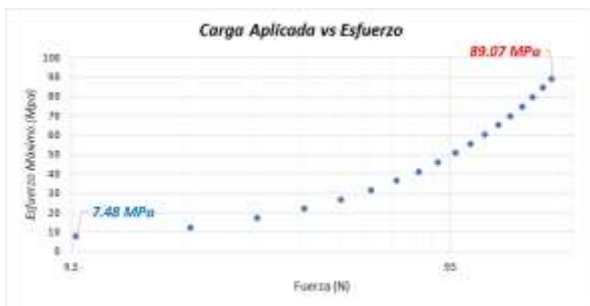


Fig. 13. Carga aplicada vs Esfuerzo

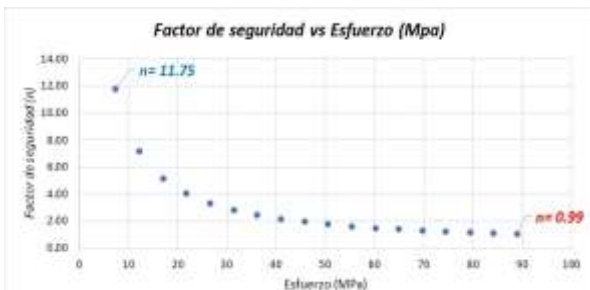


Fig. 14. Factor de seguridad vs Esfuerzo

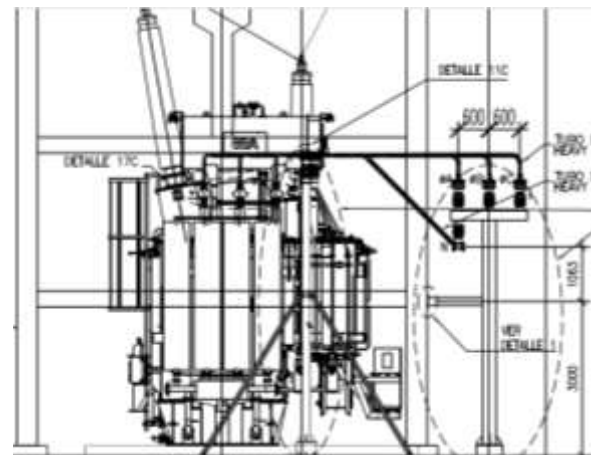
IV. CONCLUSIONES (CAUSA RAÍZ)

La falla en los bornes del terciario en el banco de transformación se debió a una combinación de los siguientes factores:

- Falta de rigidez estructural en los soportes del bus terciario.
- Selección inadecuada del conector semiflexible entre el bus del terciario y el borne, ya que, al ser semiflexible, transmite desplazamientos al borne, además de que, en el diseño de este conector, se tenía un vástago que, por deficiencias en el montaje, generaba una condición de pretensado, lo que aumentaba la posibilidad de falla en el borne.
- Falta de absorción o falta de restricción de movimiento en los tres ejes X, Y y Z, para no transmitir fuerzas al borne que le pudieran ocasionar un daño al elemento más débil, que es el cerámico.
- De los resultados obtenidos en el modelo por elemento finito, una vez que se aplican esfuerzos diferentes a los de compresión, se observa que la falla en el material cerámico inicia por la concentración de esfuerzos en la zona de sujeción del borne hasta que llega al punto de fractura; para posteriormente presentar una fuga de aceite dieléctrico en el transformador.
- El diseño del bus terciario presentó deficiencias desde su diseño, dejando a los diferentes elementos que lo conforman en una condición de vulnerabilidad por la falta de rigidez y transmisibilidad de movimiento y, por ende, transmisión y generación de esfuerzos.

V. CORRECCIÓN

Se modificó el diseño original agregando soportes en la base de la estructura metálica y cambiando a conectores flexibles, como se indica en la Fig.15.





Conexión con bus

Conexión con borne

Figura 15. Cambios d diseño [Ref. 5]

VI. RESULTADO FINAL

Con los cambios realizados a la rigidez de los soportes del bus terciario y el cambio de conectores, se determinó durante las pruebas realizadas que la transmisión de movimiento hacia las boquillas del transformador es nula, es decir, el movimiento transmitido a la parte superior (tubo de aluminio conector de expansión) es disipado en el conector.

Con el análisis realizado, se determinó la causa raíz de la falla en el equipo y se generaron las acciones correctivas para darle confiabilidad al banco de transformación, incorporándolo nuevamente al Sistema Eléctrico Nacional

REFERENCIAS

- [1] Documento 1ZBA276002- E, -F, -G, denominado Buching with connecting flag Um=52 kV 1000 – 3150 A E DIN 42534, ABB.

- [2] Jose Ignacio Pastor Caño, “Fractura de materiales cerámicos estructurales avanzados”, Memoria para la obtención de grado de Doctor en Ciencias Físicas, pp.~ 13-14, Madrid, 1993.
- [3] Delta Conectores, S.A. de C.V., “Catalogo General”, conectores de expansión, pp.~ H-53. Aguascalientes, 2018.
- [4] Informe K3313 18 117 02, “Estudio de caracterización de falla a una muestra de boquilla cerámica” pp.~ 8,10. LAPEM, México 2018.
- [5] Plano número CUM-S01-E-CAH-002, Revisión 3, titulado “Conductores, aisladores, herrajes, y conectores. Cortes”
- [6] Informe K3NO3104-2018, “Análisis de falla en bornes cerámicos de los transformadores del banco de transformación”, LAPEM, México, 2018.

RESEÑA SOBRE LOS AUTORES

Arturo García Carrión, Ingeniero Mecánico egresado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí; ingresó al LAPEM en 2011, donde se desempeña como ingeniero de pruebas en el área de Sistemas Mecánicos. Ha realizado por un periodo de 8 años análisis y diagnósticos de maquinaria rotatoria y sistemas dinámicos. Es analista de vibraciones nivel III, por el Vibration Institute. (arturo.garcia@cfe.mx)

Karla Martínez Juárez, Ingeniero Químico y Maestra en polímeros egresada del Instituto Tecnológico de Ciudad Madero; con Doctorado en Ciencias en Ingeniería Química por la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, ingresó al LAPEM en 2012, en la Oficina de Mecánica y Materiales. Implemento el área de espectroscopia y análisis térmico para análisis de materiales poliméricos y cerámicos. (karla.martinez@cfe.mx)