

Modelado y simulación de una borna capacitiva como elemento para atenuar el campo eléctrico en alta tensión

Aragón-Verduzco D.A.¹, González-Montañez F.¹, Jimenez-Mondragon V.M.¹
y Olivares-Galván J.C.¹

¹ Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Departamento de Energía, Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas, Alcaldía Azcapotzalco, C.P. 02200, CDMX., daav@azc.uam.mx, flgm@azc.uam.mx, vmjm@azc.uam.mx, jolivares@azc.uam.mx

Resumen

Este estudio presenta un modelo y simulaciones detalladas de una borna de alta tensión, empleando un paquete computacional comercial basado en el método de los elementos finitos. Una de las simulaciones muestra el comportamiento del potencial del campo eléctrico, mientras que otra implementa un método capacitivo para atenuar el gradiente de dicho potencial. Se detallan las características eléctricas, geometría y materiales utilizados en la borna, así como una metodología simplificada para el desarrollo del sistema capacitivo. Posteriormente, se comparan y analizan los resultados obtenidos en ambas simulaciones, evaluando los kV/mm en la superficie del aislador. Los resultados resaltan la relevancia de la atenuación del campo eléctrico mediante el sistema capacitivo. Esta técnica ayuda a mitigar la alta concentración de potencial eléctrico, controlando los esfuerzos dieléctricos que podrían provocar descargas incipientes, parciales o totales en los materiales aislantes. Asimismo, contribuye a prevenir daños en el aislamiento y a evitar un envejecimiento prematuro del material dieléctrico.

Palabras clave— Atenuación del campo eléctrico, borna capacitiva, esfuerzos dieléctricos, método de los elementos finitos, transformador.

Abstract

This study presents a model and detailed simulations of a high-voltage bushing, using a commercial computational software based on the finite element method. First simulation shows the electric field potential behavior, whereas the second simulation implements a capacitive method to attenuate the aforementioned potential. The electrical characteristics, geometry and materials used in the bushing are detailed, as well as a simplified methodology for the capacitive system development. Subsequently, the results obtained in both simulations are compared and analyzed, evaluating the kV/mm on the surface of the insulator. These results highlight the relevance of the attenuation of the electric field potential through the capacitive system. This technique helps to mitigate the high concentration of electrical potential, controlling the dielectric stresses that could cause incipient, partial, or total discharges in the insulating materials. Likewise, it helps to prevent damage into insulation and avoid the premature dielectric material aging.

Keywords— Bushing, dielectric stresses, electric field attenuation, finite element method, transformer.

I. INTRODUCCIÓN

La borna de alta tensión es una estructura que permite aislar el conductor que lleva corriente en alta tensión, a través de un espacio en su centro, dicha estructura es conectada a tierra. El diseño de estas bornas no es tarea fácil ya que se toma en consideración principalmente la tensión máxima de operación, el nivel básico de aislamiento, la corriente térmica y el esfuerzo mecánico, a fin de conseguir las dimensiones adecuadas, prevenir descargas y garantizar la vida útil de la borna.

Las bornas capacitivas insertan capas conductoras a diferentes longitudes y radios dentro del aislamiento, estas inserciones crean elementos capacitivos. Dichas bornas se utilizan en el devanado de alta tensión de los transformadores de potencia o de instrumento, y son consideradas uno de los componentes principales ya que el funcionamiento de ellas impacta significativamente en la confiabilidad de los equipos [1].

Las causas de las fallas en las bornas de los transformadores se dividen en tres aspectos: falla mecánica, falla térmica y falla de aislamiento, que están estrechamente relacionadas con la estructura capacitiva y el entorno de operación. Una revisión sobre los reportes y artículos recientes relacionados con estas fallas se puede ver [2].

Durante el análisis de las bornas, se debe de considerar los materiales y la tecnología con que se fabrican, ya que hay una variedad extensa, de manera general, estas contienen aceite mineral de grado eléctrico entre el conductor y el aislante, el aislamiento más usado es papel impregnado de aceite (OIP, por sus siglas en inglés), papel impregnado de resina (RIP, por sus siglas en inglés), papel unido con resina (RBP, por sus siglas en inglés) y fibra impregnada de resina (RIF, por sus siglas en inglés). Estas presentan ventajas y desventajas entre sí, pero en todas es fundamental realizar un correcto diseño de la estructura del aislante [3].

Un análisis para el dimensionamiento del sistema de aislamiento de tipo capacitivo, basado en una expresión analítica para el cálculo del campo eléctrico en los bordes de las pantallas se realiza en [4]. El volumen del sistema de aislamiento de la borna del transformador obtenido con esta expresión analítica nueva se logró reducir un 7,3% en comparación con el enfoque tradicional, que se basa en los campos eléctricos en la dirección radial y axial. La borna fabricada bajo este nuevo criterio pasó con éxito todas las pruebas prototipo y de rutina, de acuerdo las normas IEC 60137.

Por otra parte, en [5], usando el método de los elementos finitos, se simuló a diferentes temperaturas, la prueba de

permitividad y de descarga parcial incipiente en la estructura aislante de una borna OIP. Como resultado se obtuvo que cuando se incrementa la temperatura, la permitividad aumenta, pero la tensión de la descarga parcial incipiente decrece. Con estos resultados, se propuso un diseño de optimización de la borna capacitiva OIP, basado en el gradiente de temperatura, que logró una distribución uniforme del campo eléctrico axial de la borna durante su operación.

Adicionalmente en [6], se realizó un estudio basándose en las causas reales de las fallas de una borna hacia el tanque, se prepararon cuatro modelos de defectos típicos hacia el tanque y se construyó una plataforma experimental de descargas parciales que recogió la señal de descargas parciales de cada modelo. Con los datos obtenidos se analizó las características de cada una de las descargas, con el fin de mejorar la condición monitoreo, operación y mantenimiento de la borna.

Con esta breve y concisa sección de antecedentes se ha expuesto la importancia del análisis de las bornas ya que actualmente los dispositivos eléctricos son cada vez más capaces de soportar mayores niveles de tensión y, en consecuencia, presentando niveles elevados de campos eléctricos en puntos vulnerables, sumados a otros factores como, humedad, la contaminación ambiental o imperfecciones en el material aislante, que pueden ocasionar eventos que comprometan la seguridad y la continuidad del servicio eléctrico.

En este trabajo se presenta un estudio de una borna de alta tensión con un tipo de tecnología OIP que opera a una tensión máxima de 245 kV. Se presentan simulaciones utilizando el Método de los Elementos Finitos (MEF) para determinar los kV/mm, el gradiente de potencial eléctrico y conocer sus limitantes en relación con la concentración del potencial eléctrico.

II. MODELADO Y SIMULACIÓN

La metodología adoptada para llevar a cabo el desarrollo consta de un estudio en dos dimensiones a través del software computacional que hace uso del MEF como herramienta para el análisis de la distribución del potencial eléctrico.

El estudio a la borna se divide en dos etapas:

- Simulación de la borna de alta tensión (sin método de atenuación).
- Simulación de la borna de alta tensión con un método de atenuación capacitivo.

A. Simulación sin sistema de atenuación

Para el desarrollo de esta sección, los datos de la Tabla I corresponden a las características destacadas que se relacionan con esta borna.

En la Fig. 1 se muestra la geometría, esta contempla el compensador de aire, la superficie del aislador de porcelana y las bridas, conductor y sistema aislante.

Para las propiedades de los diferentes materiales que componen el modelo de la borna, se utilizan las permitividades relativas que se mencionan en la Tabla II.

TABLA I
DATOS DE LA BORNA

Ítem	Parámetros de la borna	Valores en kV
1	Tensión nominal máxima	245
2	Tensión de fase	141.45
3	Tensión de prueba/dieléctrico.	505
4	Tensión de impulso/BIL	1050

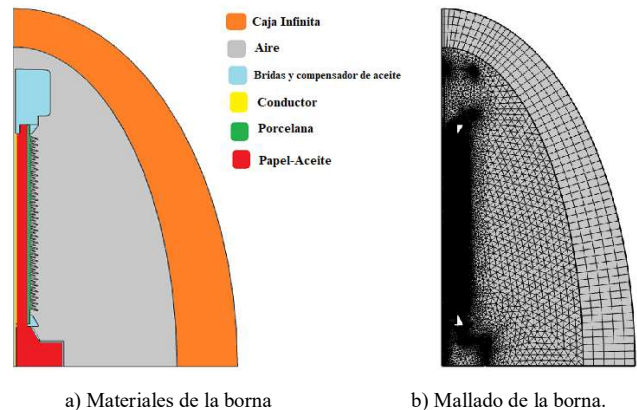


Fig. 1. Geometría de la borna

TABLA II
PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.

Material	Permitividad relativa
Aire	1
Papel-Aceite	2.2
Porcelana	6
Acero AISI 4340	1

B. Simulación con método de atenuación capacitivo

Para el desarrollo de esta segunda etapa, por medio de pantallas conductoras insertadas en el aislamiento se crea un sistema capacitivo con el objetivo de reducir la alta concentración de potencial eléctrico en los aislamientos de la borna. Al diseñar el sistema capacitivo, lo primero que se debe tomar en cuenta es el número de pantallas que la compondrán. Para ello se utiliza la expresión mostrada en (1).

$$No. \text{ pantallas} = \frac{V_{m\acute{a}x} \text{ del sistema}}{Rigidez \text{ dieléctrica}} \quad (1)$$

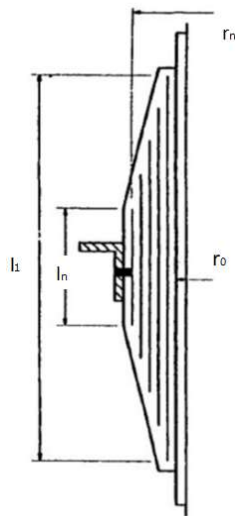
Los diámetros y longitudes de cada una de las pantallas se diseñan de forma que se pueda controlar la tensión radial y que la tensión axial sea distribuida uniformemente [7]. En la Fig. 2, se aprecian unas bornas y de manera esquemática la distribución de las pantallas conductoras (tensiones) y su dependencia de cinco factores principales:

Donde:

- r_0 : Radio del conductor (mm).
- r_n : Radio de la capa exterior (mm).
- l_1 : Longitud de la primera pantalla capacitiva (mm).
- l_n : Longitud de la última pantalla capacitiva (mm).
- V_n : Tensión nominal (kV).



a) Bornas Capacitivas



b) Esquema de la borna.

Fig. 2. Principales dimensiones de la borna capacitiva [7]

En el diseño del sistema capacitivo se deben controlar estas tensiones hasta un nivel seguro, de tal forma que conforme se alejen las pantallas del conductor sus longitudes vayan disminuyendo. Dicho lo anterior, para el cálculo de las longitudes, se consideró dividirlos en dos secciones: la parte superior (la más cercana al conductor) y la parte inferior (el segmento por debajo de la brida). Analíticamente en [3] se obtienen (2) y (3) para calcular la n-ésima pantalla superior e inferior respectivamente:

$$l_{sp(n)} = l_{sp(n-1)} - \Delta_s \tag{2}$$

$$l_{ip(n)} = l_{ip(n+1)} - \Delta_i \tag{3}$$

Donde:

- $l_{sp(n)}$: Longitud superior de la n-ésima pantalla (mm).
- $l_{sp(n-1)}$: Longitud superior de la n-ésima pantalla anterior (mm).
- Δ_s : Constante de distanciamiento superior (mm).
- $l_{ip(n)}$: Longitud inferior de la n-ésima pantalla (mm).
- $l_{ip(n+1)}$: Longitud inferior de la n-ésima pantalla siguiente (mm).
- Δ_i : Constante de distanciamiento inferior (mm).

Por tanto, obtenidas las longitudes superior e inferior se suman para obtener la longitud total de cada pantalla. Las capacitancias cilíndricas de cada una de las pantallas se calculan mediante (4).

$$C_n = \frac{2\pi\epsilon L_n}{\ln\left(\frac{r_n}{r_{n-1}}\right)} \tag{4}$$

Donde:

- r_n : Radio de la n-ésima pantalla (mm).
- $r_{(n-1)}$: Radio de la n-ésima pantalla anterior (mm).
- L_n : Longitudes de las pantallas previamente determinadas (m).
- ϵ : Permitividad de la pantalla (F/m).

De tal forma si las capacitancias de las pantallas son iguales $C_1=C_2=\dots=C_n$, se puede despejar al radio para la n-ésima pantalla, es decir, se obtiene (5).

$$r_n = e^{\left(\frac{L_n}{L_{n-1}} \ln \frac{r_{n-1}}{r_{n-2}} + \ln r_{n-1}\right)} \tag{5}$$

Donde:

- L_n : Longitud de la n-ésima pantalla (m).
- $L_{(n-1)}$: Longitud de la n-ésima pantalla anterior (m).
- $r_{(n-1)}$: Radio de la n-ésima pantalla anterior (m).
- $r_{(n-2)}$: Radio de la n-ésima pantalla tras anterior (m).

Se presentan en la Tabla III, las dimensiones calculadas para cada una de las pantallas.

TABLA III
DIMENSIONES DE LAS PANTALLAS.

Pantalla	Longitud (m)	Radio (m)
1	1.607	0.035
2	1.407	0.040
3	1.337	0.046
4	1.201	0.051
5	1.066	0.057
6	0.931	0.062
7	0.795	0.067
8	0.660	0.072
9	0.525	0.075
10	0.390	0.078
11	0.254	0.080



Fig. 3. Pantallas conductoras que se introducen en la borna.

A partir de las dimensiones para cada una de las pantallas y seleccionados los materiales de cada dominio del modelo, se procede a generar la geometría de la borna, el cual se presenta en Fig. 4.

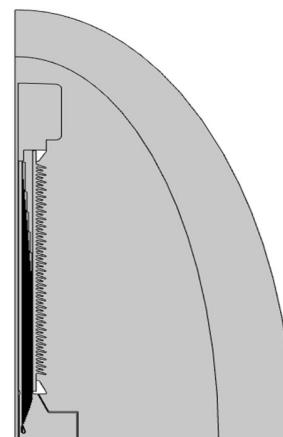


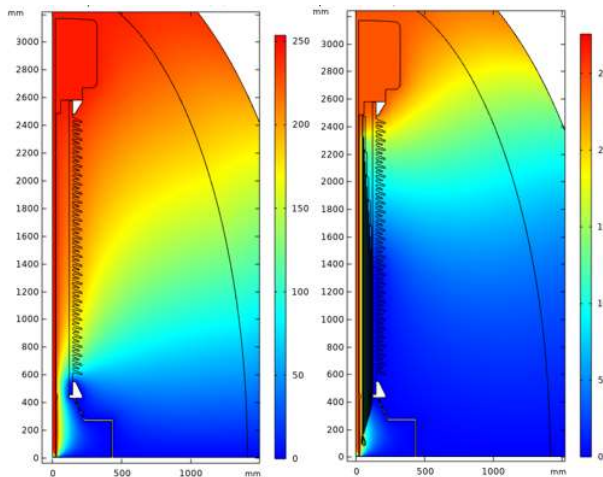
Fig. 4. Geometría de la borna con sistema de atenuación capacitivo

Los valores de frontera que se consideraron durante las simulaciones fueron los siguientes:

- Potencial eléctrico en el contorno del conductor, compensador de aceite y brida superior de 245 kV.
- Contorno de la brida inferior y tanque aterrizados a tierra.

III. RESULTADOS

En la Fig. 5 se muestra el modelo sin ningún método de atenuación, mientras que en la Figura 6 se representa el mismo modelo, pero con la implementación de un sistema de atenuación capacitivo.



a) Sin método de atenuación. b) Con método de atenuación capacitivo.

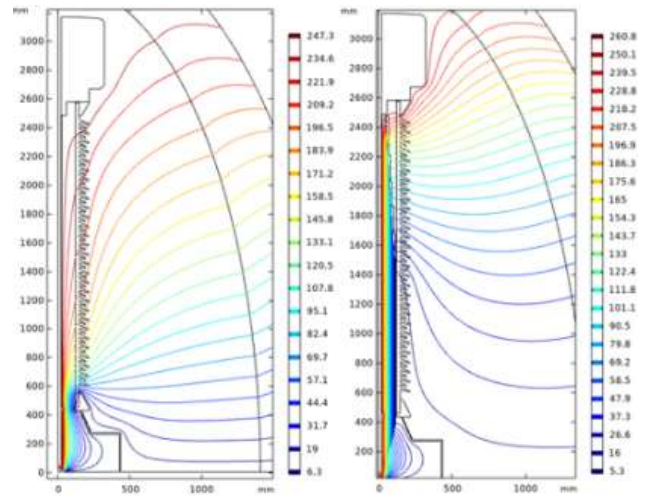
Fig. 5. Distribución del campo eléctrico en la superficie de la borna.

La Fig. 5 muestra una comparativa entre las gráficas que muestran la distribución del potencial eléctrico a lo largo de la geometría de la borna, teniendo en cuenta su máxima tensión operativa de 245 kV.

En la Fig. 6, se presentan las líneas equipotenciales o curvas de nivel obtenidas de los estudios anteriores, considerando la operación a la máxima tensión para la borna diseñada. Con el propósito de ofrecer una visualización más clara del impacto al implementar un sistema capacitivo para atenuar el gradiente del potencial eléctrico, se llevó a cabo una comparativa del esfuerzo eléctrico a lo largo de la borna, utilizando las soluciones obtenidas en ambas simulaciones. Esto permitió identificar la zona de las aletas con mayor concentración de potencial eléctrico.

Para realizar una comparación de los datos obtenidos sobre la distribución de potencial en las aletas del aislador, se eligieron tres valores representativos dentro del rango seleccionado, los cuales se muestran en la Fig. 7. Es evidente la reducción significativa en la magnitud del potencial del campo eléctrico al aplicar el método de atenuación, como el arreglo de pantallas capacitivas. Se nota que la distribución del potencial eléctrico muestra un nivel de tensión más elevado en el conector, que está conectado a la línea de 245 kV. Sin embargo, a medida que el nivel de aislamiento aumenta a través de las pantallas capacitivas, el potencial disminuye gradualmente hasta alcanzar un valor de 0 kV.

La Tabla IV muestra los valores de potencial en kV/mm por longitud de arco (mm) de las simulaciones realizadas a la borna.



a) Sin método de atenuación. b) Con método de atenuación capacitivo.

Fig. 6. Distribución de las líneas equipotenciales del campo eléctrico.

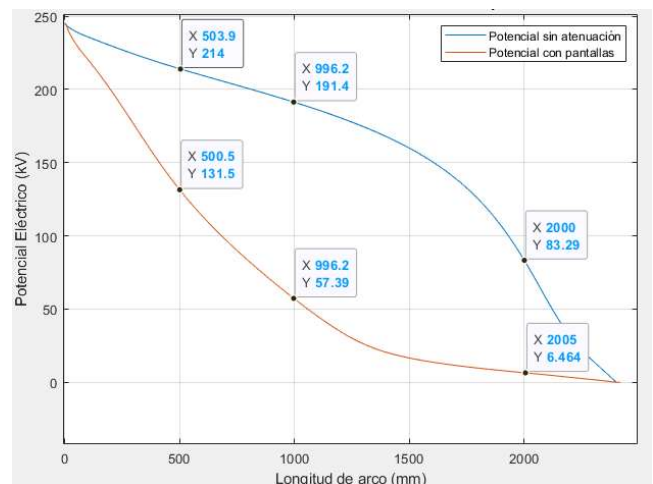


Fig. 7. Distribución de potencial eléctrico de los dos estudios en la borna.

TABLA IV
VALORES DE POTENCIAL ELÉCTRICO EN LA BORNA

Longitud de arco (mm)	Potencial eléctrico (kV/mm) Sin atenuación	Potencial eléctrico (kV/mm) Con atenuación
500	214	131.5
1000	191.4	57.39
2000	83.29	6.46

Mediante la comparación de las curvas de distribución de potencial en las aletas y el análisis de sus valores, se calcula un promedio que determina el porcentaje de reducción a lo largo de esta zona, mostrado en la Tabla V. Esta evaluación facilita la comprensión del impacto de la implementación de un sistema capacitivo para mitigar el potencial eléctrico en una borna de alta tensión. Esto, a su vez, previene el posible deterioro prematuro del aislamiento y reduce el riesgo de fallas en el sistema eléctrico de potencia.

TABLA V
PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DEL POTENCIAL ELÉCTRICO EN LA BORNA

Tipo	Promedio (kV/mm)	Reducción (kV)	% Reducción
Sin atenuación	162.896	97.778	60.02
Con atenuación	65.118		

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Fig. 5, inciso a), claramente se aprecia que el potencial del campo eléctrico se distribuye con mayor magnitud e intensidad a lo largo de casi toda la borna, desde los 3500 mm hasta 450 mm. Por otro lado, en el inciso b), el mayor potencial del campo eléctrico se distribuye en menor espacio solamente entre los 3500mm y 2300 mm, de esta forma se asegura que el arreglo de pantallas logra reducir el potencial eléctrico de forma óptima, confiable y segura en la zona de las aletas de la borna permitiendo que la parte del tanque no se presenten esfuerzos eléctricos.

De igual manera, en la Fig. 6, inciso a), el potencial se mantiene distribuido a lo largo del conductor, atravesando el aislamiento interno y se observa que se tiene un alto potencial de campo eléctrico (alrededor de 50 kV), en la parte inferior, es decir, existe la posibilidad de que se generen descargas en la brida inferior o tanque provocando daños al aislamiento y la estructura de la borna. Por otra parte, en el inciso b), el potencial se ve mejorado por las pantallas capacitivas (alrededor de 5 kV en la zona inferior), logrando que se disminuya de forma gradual a lo largo de la superficie de las aletas y obligando a que las líneas equipotenciales no atraviesen por los diferentes aislamientos de la borna, sino que rodeen las pantallas dando una mayor separación y reduciendo así el potencial del campo eléctrico distribuido por la borna.

En la Tabla IV, se tiene una comparación de las simulaciones realizadas a la borna a diferentes distancias: 500, 1000 y 2000 mm. Para el caso que no se tiene sistema de atenuación, se observa claramente que, al recorrer una distancia de 500 mm, se tiene un valor de tensión de 214 kV, el cual es un valor alto y puede perjudicar la vida del aislamiento de la borna y derivar en la explosión de esta. Esto advierte un grave problema, aunque es gradual el decaimiento del potencial del campo eléctrico, este continúa siendo elevado e imposibilitaría el acercarse a la borna. Con la implementación del sistema capacitivo para la atenuación del potencial elevado, se obtiene una reducción significativa del potencial, donde al comparar los estudios a la misma distancia de 500 mm se tiene un potencial de 131.5 kV, es decir un 38.5% menos que en el primer caso.

V. CONCLUSIONES

Este estudio comparativo analizó dos escenarios de simulación de una borna de alta tensión de un transformador con una capacidad máxima de operación de 245 kV, utilizando tecnología OIP. En el primer caso, se examinó la borna sin ningún método de atenuación, mientras que en el segundo caso se implementó un método capacitivo para la atenuación. Los

resultados demuestran que la introducción de un sistema de pantallas capacitivas en el aislamiento de la borna (Fig. 3) conlleva una reducción significativa en la alta concentración de potencial eléctrico en la superficie del aislador. Un aspecto destacado de este análisis mediante MEF radica en su capacidad para calcular con precisión las tensiones mínimas y máximas en cualquier zona o material, lo que ofrece una comprensión detallada de la distribución del potencial del campo eléctrico. Esta metodología no solo permite visualizar con precisión la distribución del potencial eléctrico, sino que también proporciona información valiosa para comprender los esfuerzos dieléctricos en la borna. Así, la implementación del sistema capacitivo resulta ser una solución efectiva para mitigar los problemas asociados con altas concentraciones de potencial eléctrico en los aisladores, lo que puede prevenir posibles daños en el aislamiento y el envejecimiento prematuro del material dieléctrico.

Los resultados obtenidos revelan que en la simulación dos, donde se implementó el método de atenuación, se logra una reducción del 60 % en el gradiente del potencial del campo eléctrico tangencial en la superficie de los aisladores o aletas de la borna. Estos resultados confirman la efectividad del método de atenuación mediante pantallas capacitivas en el diseño y control de los esfuerzos eléctricos en las bornas.

Esta reducción significativa en los valores del potencial eléctrico indica la pertinencia de este enfoque para prevenir un envejecimiento acelerado del aislamiento en estas áreas críticas. Así, la aplicación exitosa de pantallas capacitivas es una estrategia precisa y eficaz para mitigar los niveles de potencial eléctrico, cuidando la integridad del aislamiento y prolongando la vida útil de las bornas del transformador en la alta tensión.

REFERENCIAS

- [1] Velásquez, R. M. A., & Lara, J. V. M. (2018). Bushing failure in power transformers and the influence of moisture with the spectroscopy test. *Engineering Failure Analysis*, 94, 300-312.
- [2] Yuan, Z., Sun, G., Tang, H., Gao, K., Hu, J., & He, J. (2023). Types and Mechanisms of Condenser Transformer Bushing Failures. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 39(5), 26-36.
- [3] Rahman, N. A., Isa, M., Rohani, M. N. K. H., Hamid, H. A., & Abdullah, M. M. A. B. (2019, August). Electric Field and Voltage Distribution (EFVD) Analysis for 132kV Bushing Transformer Using Finite Element Analysis. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 551, No. 1, p. 012019). IOP Publishing.
- [4] Filipovic-Grcic D. et al., (2017). Electric field at sharp edge as a criterion for dimensioning condenser-type insulation systems, *Electric. Power Syst. Res.* 152, 485–492.
- [5] Liu, D., Zhao, Z., & Chen, X. (2020, October). Main Insulation Structure Optimization of OIP Capacitive Bushing Base on Temperature Gradient. In *2020 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)* (pp. 298-301). IEEE.
- [6] Yu, N., An, B., Ding, J., Wang, R., Yu, Q., Ma, X., & Li, Q. (2022, March). Study on Partial Discharge Characteristics of Typical Defects of Oil-paper Capacitor Bushing. In *2022 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)* (Vol. 6, pp. 625-629). IEEE.
- [7] Ryan H.M., (2016). *High-voltage engineering and testing*, 3rd edition. December 19.