



Crecimiento de algas sobre aisladores de media tensión y su impacto sobre el desempeño eléctrico

Algae growth on medium voltage insulators and its impact on electrical performance

Carlos Daniel Pérez¹, Herbert Enrique Rojas², Andrés Felipe León³, Luis Felipe Cantor⁴

Fecha de recepción: Agosto 28 de 2015

Fecha de aceptación: Septiembre 25 de 2015

Como citar: Pérez, C., Rojas, H., León, A., & Cantor, L. (2015). Crecimiento de algas sobre aisladores de media tensión y su impacto sobre el desempeño eléctrico. *Revista Tecnura*, 19 (CITIE), 24-32. doi: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.ICE.a02>

Resumen

En este artículo se reportan los resultados de una investigación realizada sobre el desempeño eléctrico de aisladores de media tensión (cerámicos y poliméricos) contaminados con un alga común. El crecimiento biológico sobre de los aisladores se consiguió usando una cámara de ambiente controlado (CAC) que permite ajustar temperatura, humedad y radiación ultravioleta. Se realizaron pruebas de tensión de flameo (a baja frecuencia e impulso) y medición de corrientes de fuga para determinar el efecto de la biocontaminación en los aisladores. Luego de la contaminación se evidenció una reducción de hasta 11 % en las tensiones de flameo de los aisladores cerámicos, mientras en los aisladores poliméricos esta reducción no superó el 3%. En todos los casos se reportaron incrementos en las corrientes de fuga superiores al 17%.

Palabras clave: algas, aisladores de media tensión, biocontaminación, pruebas eléctricas

Abstract

In this paper the results obtained from an investigation about the electrical performance of medium voltage insulators (ceramic and polymeric) contaminated with a common algae are reported. Biological growth on insulators was achieved using a controlled environment chamber (CEC) that allows adjust temperature, humidity and ultraviolet radiation. Flashover voltage testing (at low frequency and impulse) and measurements of leakage currents were performed to determine the effect of biocontamination on the insulators. After contamination a reduction up to 11% in flashover voltages of ceramic insulators was observed, while this reduction did not exceed 3% in polymeric insulators. In all cases, increases above 17% in leakage currents were reported.

Keywords: algae, biocontamination, medium voltage insulators, electrical testing

¹ Estudiante de Ingeniería Eléctrica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia. Contact: cdperezc@correo.udistrital.edu.co

² Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Candidato a Doctor en Ingeniería Eléctrica, Profesor Asistente Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia. Contact: herojasc@udistrital.edu.co

³ Estudiante de Ingeniería Eléctrica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia. Contact: afleonm@correo.udistrital.edu.co

⁴ Estudiante de Ingeniería Eléctrica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia. Contact: lfcantorb@correo.udistrital.edu.co

INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores problemas a los que están sometidos los aisladores eléctricos es la degradación por diferentes efectos ambientales. Estos efectos incluyen exposición ultravioleta, humedad, calor, luz solar y la degradación biológica causada por microorganismos presentes en el aire (Amin & Salman, 2006). Este fenómeno de crecimiento y desarrollo de colonias microbianas sobre la superficie de aisladores ha sido reportado en diversas regiones del mundo y afecta el desempeño de estos elementos de protección sin importar su nivel de tensión o el tipo de material (R. Gorur & Montesinos, 2003; Lazar, Wills, Ho, Harris, & Spohr, 2008; León, Rojas, Cantor, & Pérez, 2014; Wallström, Dernfalk, & Bengtsson, 2005). No obstante, los efectos que genera la contaminación microbiana sobre aisladores eléctricos de media y alta tensión no son bien conocidos, pues este tipo de contaminación no está limitada a una región específica del planeta y puede tener lugar bajo múltiples condiciones ambientales.

Varios estudios señalan que el desarrollo microbiano se ve beneficiado por condiciones ambientales propias de los climas tropicales (Amin & Salman, 2006; Atarjabarzadeh, Strömberg, & Karlsson, 2011; Meijer, Houbraken, Dalhuijsen, Samson, & de Vries, 2011). Colombia al estar situado cerca de la línea del Ecuador es un país que presenta condiciones ambientales propicias (altitudes entre 0 y 3450 msnm, temperaturas entre 0°C y 40°C y niveles de humedad superiores al 50%) para que el desarrollo biológico sobre aisladores eléctricos sea una posibilidad.

La *Chlorella vulgaris* es un alga verde unicelular cuyo crecimiento es muy común en zonas húmedas y con altos niveles de radiación solar. El crecimiento de esta alga en aisladores y otros materiales aislantes ha sido reportado en algunas zonas del mundo (R. S. Gorur, Montesinos, Roberson, Burnham, & Hill, 2003; Kumagai, 2007; Wallström, 2005). Este trabajo presenta, a partir de pruebas de laboratorio, el efecto que la contaminación por *Chlorella vulgaris* provoca sobre el desempeño eléctrico de aisladores cerámicos y poliméricos usados en sistemas de distribución.

El resto de este artículo se organiza de la siguiente manera: en la sección 2, se describen las especificaciones técnicas de los aisladores seleccionados. El proceso para efectuar la contaminación en los aisladores y el resultado de las pruebas de identificación biológica en el laboratorio se muestran en las secciones 3 y 4, respectivamente. La metodología aplicada para realizar las pruebas eléctricas se describen en la sección 5. En las secciones 6 y 7 se muestran los resultados de las pruebas de tensión de flameo y de corrientes de fuga efectuadas sobre los aisladores contaminados. Finalmente, algunas conclusiones se presentan en la sección 8.

AISLADORES SELECCIONADOS

Para este trabajo se escogió un aislador cerámico de suspensión tipo ANSI 52-1 y otro de material polimérico tipo ANSI DS-15. Estos aisladores fueron seleccionados teniendo en cuenta que son usados frecuentemente en sistemas de media tensión de Colombia, Estados Unidos y otros países de América, Asia y Europa. La Tabla 1 muestra las

Tabla 1. Especificaciones técnicas de los aisladores seleccionados a condiciones estándar

| Identificación del aislador | Material | Número de discos | Distancia de fuga [mm] | Tensión Nominal [kV] | Tensión flameo seco [kV] | Tensión flameo impulso positivo [kV] |
|-----------------------------|------------|------------------|------------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------------------|
| ANSI 52-1 | Cerámico | No aplica | 178 | 13.2 | 60 | 100 |
| ANSI DS-15 | Polimérico | 4 | 378 | 15 | 100 | 173 |

Fuente: elaboración propia

especificaciones técnicas más relevantes los aisladores elegidos para llevar a cabo este estudio.

PROCESO DE BIOCONTAMINACIÓN

Chlorella vulgaris

La *Chlorella vulgaris* es un alga unicelular de forma esférica y pigmentación verdosa que se encuentra en diferentes regiones del planeta (Amin & Salman, 2006). Esta alga tiene la capacidad de llevar a cabo procesos fotosintéticos y crece fácilmente en entornos con presencia de dióxido de carbono, agua, pequeñas cantidades de minerales o con incidencia directa de radiación solar (Mandigan, Martinko, Stahl, & Clark, 2010).

Control de las condiciones ambientales

Reportes de la colonización microbiana indican que este proceso puede tardar entre algunos meses y hasta años para ser visible sobre la superficie de los aisladores (Sylvestre, Rain, & Rowe, 2002). Con el fin de recrear las condiciones óptimas para el desarrollo de la *Chlorella vulgaris* y acelerar su crecimiento, se diseñó y construyó una cámara de

ambiente controlado (CAC) que monitorea y controla la temperatura, humedad y radiación solar (León et al., 2014). Esta decisión se tomó luego de evaluar varias alternativas en el mercado y concluir que una CAC con las dimensiones necesarias para emplazar al menos tres (3) aisladores de cada tipo seleccionado excedía el presupuesto destinado para la investigación. La Figura 1 muestra la disposición y componentes de la CAC.

El control automatizado de la CAC se realizó usando un microcontrolador Arduino Leonardo® que adquiere la información de humedad y temperatura a través de dos sensores RHT-03. A partir de esto, el sistema de control compara las mediciones de los sensores con una serie de valores preestablecidos para cada variable ambiental (referencia) y toma acciones correctivas activando o desactivando los mecanismos de niebla de alta presión, las bobillas cerámicas emisoras de calor y la unidad de ciclos de luz.

Condiciones necesarias para el desarrollo microbiano

Usando la CAC se recrearon las condiciones propicias para el crecimiento de la *Chlorella vulgaris*,

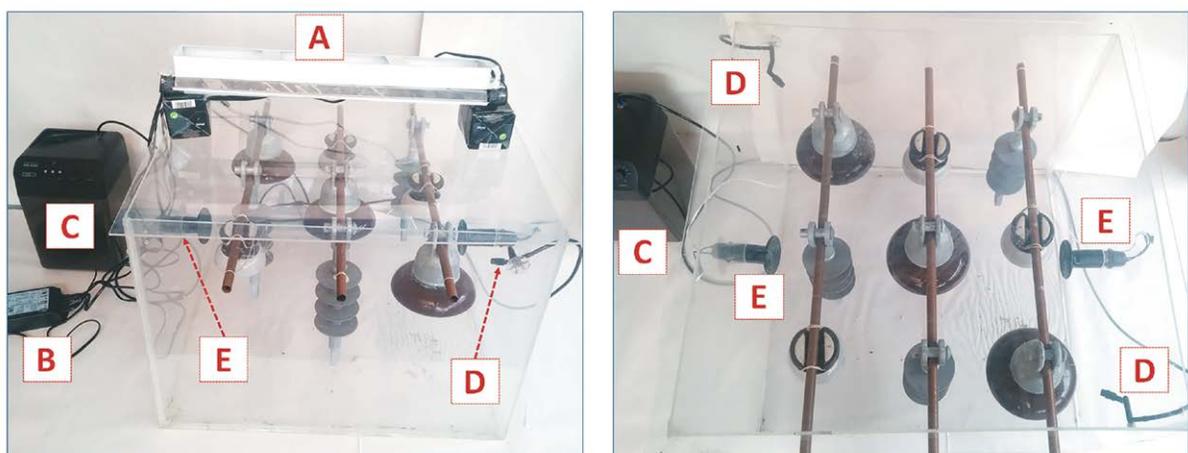


Figura 1. Cámara de ambiente controlado CAC. (A) Lámparas radiación UV (B) Control iluminación (C) Generador de humedad (D) Boquillas de salida humedad (E) Bombillas cerámicas calor

Fuente: elaboración propia

manteniendo la temperatura entre 23 y 28 °C, la humedad relativa entre 80% y 100% y proporcionando ciclos de 12 horas de luz. Además, para acelerar el proceso de crecimiento del alga se preparó un medio nutritivo usando una mezcla de agar de esporulación y otros nutrientes en los cuales la *Chlorella vulgaris* puede crecer.

De un grupo de diez aisladores de cada tipo se seleccionaron de manera aleatoria tres aisladores de suspensión cerámicos ANSI 52-1 y tres aisladores poliméricos ANSI DS-15. Con el fin de proporcionar a los microorganismos una adecuada exposición a las condiciones ambientales. Todos los aisladores fueron ubicados de manera aleatoria dentro de la CAC.

PRUEBAS BIOLÓGICAS E IDENTIFICACIÓN DEL MICROORGANISMO

Los aisladores seleccionados permanecieron al interior de la CAC durante un periodo aproximado de seis semanas consecutivas, logrando el crecimiento del microorganismo sobre los aisladores. Evidencias de la presencia de *Chlorella vulgaris* sobre la superficie de los aisladores ANSI 52-1 y

ANSI DS-15 se muestran en la Figura 2 y la Figura 3, respectivamente.

A simple vista se pudieron observar manchas irregulares de color verde distribuidas sobre la superficie de todos los aisladores. En el caso de los aisladores poliméricos ANSI DS-15 se observan estas zonas con mayor facilidad debido al contraste que tienen las colonias verdes del alga con el color gris de la superficie. En el caso del aislador de suspensión ANSI 52-1 el color oscuro de su esmalte reduce la visibilidad de las colonias de *Chlorella vulgaris*.

Con el propósito de asegurar la presencia del alga sobre la superficie de los aisladores, se obtuvieron diversas muestras para realizar una adecuada identificación del microorganismo en un laboratorio especializado. De acuerdo a las pruebas biológicas, la identificación de *Chlorella vulgaris* sobre la superficie de los aisladores cerámicos y poliméricos fue positiva. Además de la presencia del alga, también se identificó en menores proporciones el hongo *Penicillium Sp.* y rezagos de hongos de la familia *mycelia*. La Tabla 2 presenta los resultados del conteo poblacional para las muestras tomadas de los aisladores contaminados.



Figura 2. Aislador ANSI 52-1 después de la biocontaminación con *Chlorella vulgaris*

Fuente: elaboración propia



Figura 3. Aislador ANSI DS-15 después de la biocontaminación con *Chlorella vulgaris*

Fuente: elaboración propia

Tabla 2. Conteo poblacional *Chlorella vulgaris*

| Microorganismo | Identificación Positiva | Tipo de aislador | | |
|------------------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | ANSI 55-2 | ANSI 52-1 | ANSI DS-15 |
| <i>Chlorella vulgaris</i> | SI | 480000 células/ml | 534000 células/ml | 572000 células/ml |
| <i>Penicillium Sp.</i> | SI | 17000 células/ml | 21000 células/ml | 19000 células/ml |
| <i>mycelia</i> | SI | IC | IC | IC |
| IC: muy pocas para realizar conteo | | | | |

Fuente: elaboración propia

Estos resultados muestran que aunque durante esta investigación se cumplieron protocolos de higiene y seguridad biológica, en caso de replicar pruebas como las presentadas en este artículo es indispensable tener conocimiento de los procesos biológicos. Esto a fin de mitigar el riesgo de contaminación de las muestras con otros microorganismos presentes en el aire y mantener un control adecuado de los procesos de desarrollo y crecimiento microbiano.

METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE LAS PRUEBAS ELÉCTRICAS

Los ensayos eléctricos fueron realizados en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (LAT-UD), ubicado en Bogotá, Colombia (4 ° 36 'N, 74 ° 5' W y 2.640 msnm). Las pruebas realizadas antes y después de la biocontaminación con *Chlorella vulgaris* incluyeron ensayos de corrientes de fuga (CF), tensión de flameo en seco a baja frecuencia (TFS), tensión de flameo en húmedo a baja frecuencia (TFH) y tensión de flameo ante el impulso positivo (TFI). Todas las pruebas se realizaron siguiendo los procedimientos descritos en la norma técnica colombiana NTC 1285 (ICONTEC, 2002). La Figura 4 y la Figura 5 muestran los circuitos usados para los ensayos de flameo en baja frecuencia y ante impulso, respectivamente.

Para el desarrollo de todas las pruebas eléctricas y con el fin mantener un control sobre las muestras contaminadas, los aisladores cerámicos y

los aisladores poliméricos fueron identificados con un código (letra-número). En cada caso, se tomaron cinco mediciones por aislador para calcular la media aritmética como valor final. Además, se realizaron mediciones de presión [mmHg], temperatura ambiente [°C] y humedad relativa [%] a fin de aplicar las correcciones ambientales del caso en cada prueba (ICONTEC, 2002). Es importante anotar que para los aisladores de material polimérico tipo ANSI DS-15 sólo se pudieron realizar pruebas de tensión de flameo a frecuencia industrial (seco y húmedo). Esto debido a que la tensión aplicada para conseguir flameo al impulso positivo superaba los límites de la fuente de generación de tensión del LAT-UD (100 kV rms).

RESULTADOS

Pruebas de tensión de flameo

Antes de realizar la contaminación biológica, y como parte de las pruebas de referencia, se realizaron pruebas de TFS, TFH y TFI sobre los aisladores seleccionados. Luego, los aisladores fueron llevados a la CAC para el proceso de contaminación biológica durante seis semanas. Finalmente, los aisladores fueron retirados de la cámara y transportados nuevamente al LAT-UD para realizar los respectivos ensayos. Todas las pruebas (antes y después de la biocontaminación) fueron realizadas siguiendo los procedimientos descritos en la sección 5. La Tabla 3, la Tabla 4 y la Tabla 5 muestran los resultados de las pruebas de referencia y

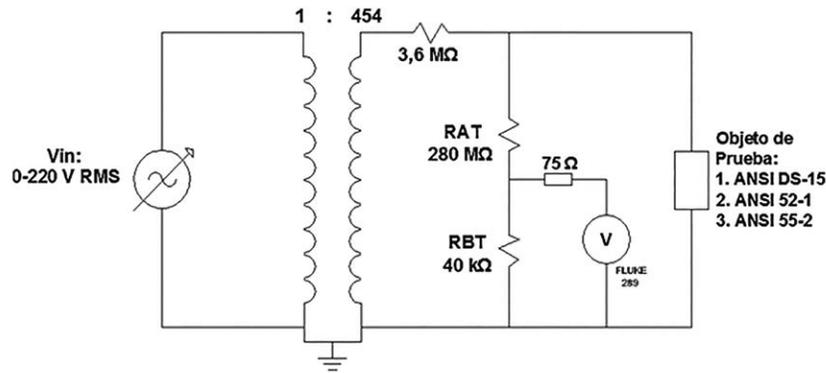


Figura 4. Circuito empleado en el LAT-UD

Fuente: elaboración propia

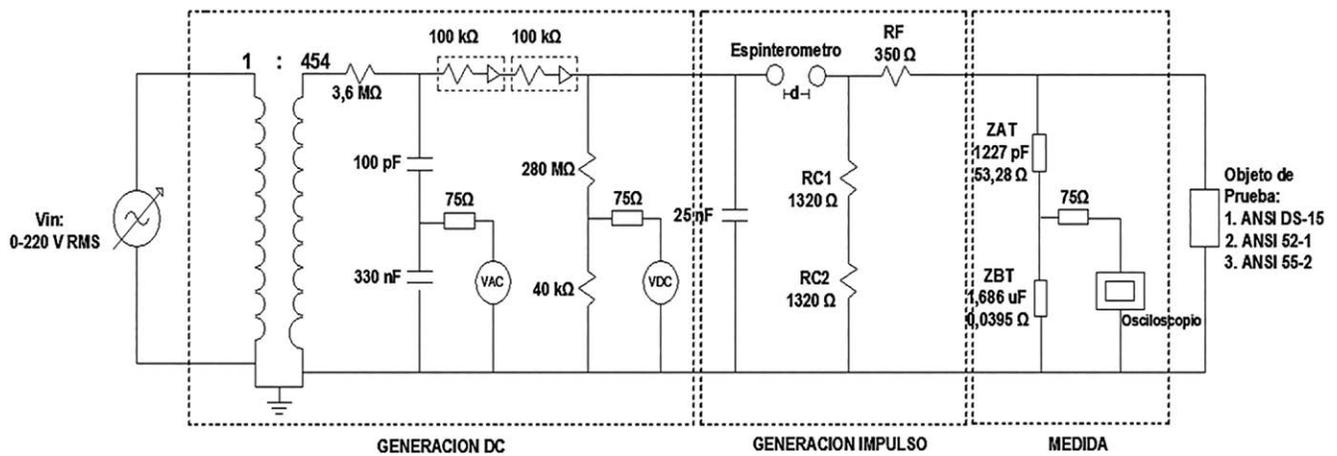


Figura 5. Circuito empleado en el LAT-UD

Fuente: elaboración propia

Tabla 3. Valores obtenidos para la TFS de los aisladores biocontaminados

| Identificación del aislador | Referencia TFS [kV] | Biocontaminados TFS [kV] | Reducción | |
|-----------------------------|---------------------|--------------------------|-----------|------|
| ANSI 52-1 | CI-A1 | 52.75 | 48.73 | 7.6% |
| | CI-A2 | 51.92 | 49.05 | 5.5% |
| | CI-A3 | 53.30 | 49.92 | 6.3% |
| ANSI DS-15 | PI-A1 | 65.24 | 62.58 | 4.1% |
| | PI-A2 | 62.82 | 60.78 | 3.2% |
| | PI-A3 | 62.82 | 60.89 | 3.1% |

Fuente: elaboración propia

de los aisladores contaminados respecto a las tensiones de flameo TFS, TFH y TFI, respectivamente.

De las pruebas de referencia se tiene que el valor de tensión de flameo más grande que se presentó fue en la prueba de TFI sobre los aisladores cerámicos ANSI 52-1 con un valor promedio de 64.14 kV. Comparando los resultados presentados en la Tabla 3 se puede observar que para las pruebas de TFS los aisladores cerámicos contaminados presentaron una reducción entre 5% y 8%. En el caso de los aisladores poliméricos la reducción promedio de la TFS fue de 3.5%. De los resultados mostrados en la Tabla 4 se puede observar que luego de la contaminación con *Chlorella vulgaris* los aisladores ANSI 52-1 presentaron una reducción promedio en la TFH de 11%, mientras que para los aisladores ANSI DS-15 los valores de TFH se redujeron sólo en un 3%. Finalmente, analizando los resultados presentados en la Tabla 5 se observa que los aisladores de suspensión registran una reducción promedio de 6% en la TFI.

Pruebas de corrientes de fuga

Para el caso de los ensayos de corrientes de fuga, la tensión aplicada sobre los aisladores fue definida de tal manera que se previniera la ocurrencia de flameo sobre el aislador. Con esto se evita no sólo la disrupción a través del aire, sino la aparición de corrientes elevadas. En este trabajo se aplicó tensión desde 10 kV hasta aproximadamente el 75% de la tensión de flameo corregida (por condiciones ambientales) que se esperaba para cada aislador.

Para obtener el valor de la corriente que circula por tierra se conectó una resistencia shunt de 1 k Ω en serie entre los aisladores y la referencia del sistema. Los resultados de las pruebas de corrientes de fuga para los dos tipos de aisladores se muestran en la Figura 6. Para facilitar la comprensión de los resultados, cada muestra (aislador bajo prueba) fue distinguida con un color diferente y en todos los casos las líneas continuas representan los valores de referencia y las líneas punteadas muestran los valores después de la biocontaminación.

Tabla 4. Valores obtenidos para la TFH de los aisladores biocontaminados

| Identificación del aislador | Referencia TFH[kV] | Biocontaminados TFH[kV] | Reducción | |
|-----------------------------|--------------------|-------------------------|-----------|-------|
| ANSI 52-1 | CI-A1 | 31.94 | 29.08 | 9.0% |
| | CI-A2 | 32.71 | 28.95 | 11.5% |
| | CI-A3 | 33.58 | 29.35 | 12.6% |
| ANSI DS-15 | PI-A1 | 58.14 | 56.60 | 2.7% |
| | PI-A2 | 58.56 | 56.77 | 3.1% |
| | PI-A3 | 57.97 | 56.50 | 2.5% |

Fuente: elaboración propia

Tabla 5. Valores obtenidos para la TFI de los aisladores biocontaminados

| Identificación del aislador | Referencia TFI[kV] | Biocontaminados TFI[kV] | Reducción | |
|-----------------------------|--------------------|-------------------------|-----------|-------|
| ANSI 52-1 | CI-A1 | 63.73 | 61.02 | 4.25% |
| | CI-A2 | 64.13 | 60.28 | 6.00% |
| | CI-A3 | 64.21 | 60.40 | 5.93% |

Fuente: autoría propia

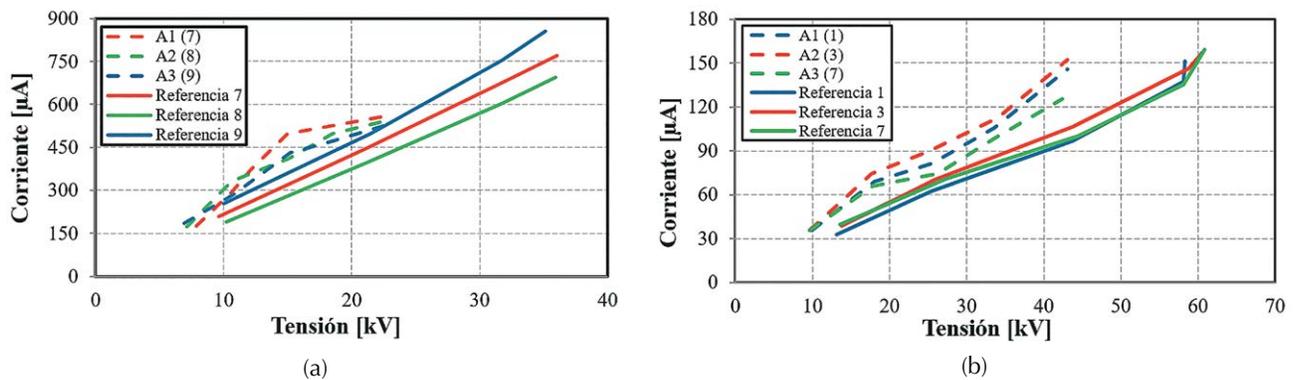


Figura 6. Corrientes de fuga en aisladores contaminados (a) ANSI 52-1 (b) ANSI DS-15

Fuente: elaboración propia

Para el caso de los aisladores ANSI 52-1 (ver Figura 6(a)), las corrientes de fuga en los aisladores contaminados con *Chlorella vulgaris* presentan un incremento promedio de 18% respecto a las corrientes obtenidas con el grupo de referencia para tensiones aplicadas entre 8 y 22 kV. Sin embargo, el valor máximo de las corrientes de fuga alcanzadas durante el desarrollo de la prueba con aisladores contaminados fue de 520 μA con 24 kV, mientras que en los aisladores limpios se lograron aplicar tensiones de hasta 36 kV con corrientes de fuga máximas de 865 μA .

Finalmente, para el caso de los aisladores poliméricos, cuyos resultados se muestran en la Figura 6(b), se alcanzaron valores máximos de corrientes de fuga cercanos a los 150 μA tanto en aisladores nuevos como en aisladores contaminados. Sin embargo, la tensión alcanzada en las muestras contaminadas momentos previos a la producción de descargas múltiples fue cercana a los 42 kV, valor que está por debajo de los 60 kV alcanzados en las pruebas de referencia. Es posible observar como para valores similares de tensión (en el rango entre 10 kV y 42 kV) las corrientes de fuga de las muestras contaminadas aumentaron en promedio 32% respecto a las registradas para aisladores limpios. De manera general, la reducción en el valor de tensión aplicada al evaluar las corrientes de fuga fue de 50% en aisladores cerámicos ANSI 52-1 y hasta de 42% en aisladores poliméricos.

CONCLUSIONES

Este artículo presentó un estudio relacionado con el desempeño eléctrico de aisladores cerámicos tipo ANSI 52-1 y aisladores poliméricos ANSI DS-15 ante el crecimiento del alga *Chlorella vulgaris* en su superficie. Las pruebas de laboratorio mostraron que es posible el crecimiento y desarrollo del alga en aisladores cerámicos y poliméricos bajo condiciones ambientales por encima de los 25°C y con humedades relativas superiores al 80%.

De los resultados presentados en esta investigación se puede concluir que luego de la contaminación con *Chlorella vulgaris* por un periodo de seis semanas, los aisladores cerámicos contaminados muestran reducciones de hasta 11% en las tensiones de flameo, mientras en los aisladores poliméricos esta reducción no superó el 3%. Además, en todos los casos se reportaron incrementos en las corrientes de fuga superiores al 17% y reducciones en el valor de tensión aplicada por encima del 40% momentos previos a la producción de descargas múltiples.

FINANCIAMIENTO:

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

REFERENCIAS

- Amin, M., & Salman, M. (2006). Aging of polymeric insulators (an overview). *Reviews on Advanced Materials Science*, 13(2), 93–116.
- Atarijazarzadeh, S., Strömberg, E., & Karlsson, S. (2011). Inhibition of biofilm formation on silicone rubber samples using various antimicrobial agents. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 65(8), 1111–1118.
- Gorur, R., & Montesinos, J. (2003). Mold growth on nonceramic insulators and its impact on electrical performance. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(2), 559–563.
- Gorur, R. S., Montesinos, J., Roberson, R., Burnham, J., & Hill, R. (2003). Mold growth on nonceramic insulators and its impact on electrical performance. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(2), 559–563.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas–ICONTEC. NTC 1285–Método de ensayo para aisladores de potencia eléctrica (2002).
- Kumagai, S. (2007). Influence of Algal Fouling on Hydrophobicity and Leakage Current on Silicone Rubber. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 14(5), 1201–1206.
- Lazar, E. E., Wills, R. B., Ho, B. T., Harris, M., & Spohr, L. J. (2008). Antifungal effect of gaseous nitric oxide on mycelium growth, sporulation and spore germination of the postharvest horticulture pathogens, *Aspergillus niger*, *Monilinia fructicola* and *Penicillium italicum*. *Letters in Applied Microbiology*, 46(6), 688–92.
- León, A. F., Rojas, H. E., Cantor, L. F., & Pérez, C. D. (2014). Performance of Ceramic and Polymeric Distribution Insulators with Mold Growth on its Surface. In *2014 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition–Latin America (PES T&D-LA)* (pp. 1–6). Medellín, Colombia.
- Mandigan, M., Martinko, J., Stahl, D., & Clark, D. (2010). *Brock Biology of Microorganisms* (13th Ed.). San Francisco, USA: Benjamin Cummings.
- Meijer, M., Houbraken, J. a M. P., Dalhuijsen, S., Samson, R. a, & de Vries, R. P. (2011). Growth and hydrolase profiles can be used as characteristics to distinguish *Aspergillus niger* and other black aspergilli. *Studies in Mycology*, 69(1), 19–30.
- Sylvestre, A., Rain, P., & Rowe, S. (2002). Silicone rubber subjected to combined temperature and humidity effects. *2002 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Silicone*, 355–358.
- Wallström, S. (2005). Biofilms on Silicone Rubber for Materials Outdoor High Voltage Insulation. *KTH Fibre and Polymer Technology*, (79).
- Wallström, S., Derrfalk, A., & Bengtsson, M. (2005). Image analysis and laser induced fluorescence combined to determine biological growth on silicone rubber insulators. *Polymer Degradation and Stability*, 394–400.

