

Evaluación del desempeño de aisladores de porcelana recubiertos con películas de dióxido de titanio para disminuir el ensuciamiento

Performance evaluation of ceramic insulators coated with titanium dioxide films to reduce soiling

*Lorena E. Correa^{*1}, Esteban Velilla², Maryory Gómez¹, Félix Echeverría¹, Alejandro Marín³, Juan G. Castaño¹*

¹Grupo de Corrosión y Protección-CIDEMAT. Universidad de Antioquia. Calle 67 No. 53-108. Medellín. Colombia

²Grupo de investigación en Manejo Eficiente de la Energía Eléctrica. Universidad de Antioquia. Calle 67 No. 53-108. Medellín. Colombia

³Departamento de Líneas de Alta Tensión. Codensa S.A. ESP. Bogotá. Colombia

(Recibido el 31 de agosto de 2012. Aceptado el 18 de enero de 2013)

Resumen

El ensuciamiento de aisladores eléctricos en servicio expuestos a la atmósfera constituyen un gran inconveniente para el sector eléctrico, debido a que en la superficie se deposita material de naturaleza orgánica e inorgánica, formando una capa que en presencia de humedad puede volverse conductora, produciendo diferentes fenómenos que podrían deteriorar las propiedades aislantes del elemento y finalmente conducir a la ruptura del mismo, afectando principalmente el suministro de la energía eléctrica. Actualmente se encuentra en fase de desarrollo un método que consiste en la aplicación de una película de dióxido de titanio para minimizar la acumulación de suciedad en los aisladores de porcelana sin afectar las propiedades eléctricas de los mismos. Se evaluó el desempeño de dos espesores diferentes (una y dos capas) de dicha película en aisladores de porcelana, para lo cual se realizaron pruebas de adherencia, ángulo de contacto, corriente de fuga, tensión de flameo en seco y ensayos de erosión en laboratorio. Finalmente, se evaluó el desempeño en aisladores en servicio en una torre de transmisión de energía. Los aisladores recubiertos exhiben un buen desempeño en las pruebas de laboratorio. Además, tras 5 meses de exposición en servicio en la línea de alta tensión energizada, se observa una disminución en el ensuciamiento.

* Autor de correspondencia: +57 + 4 + 2196617, fax: +57 + 4 + 2196565, correo electrónico: lore.edith.c@gmail.com (L. Correa)

----- *Palabras clave:* Ensuciamiento atmosférico, dióxido de titanio, aislador cerámico

Abstract

The soiling of in-service electrical insulators exposed to the atmosphere is a major problem in power transmission lines. Several inorganic and organic particulate materials are deposited on insulator surfaces forming a layer that could become conductive in the presence of moisture. This produces different phenomena that could deteriorate the insulating properties of the material and eventually lead to its rupture, affecting the electrical energy supply. Currently, a method based in the application of a titanium dioxide film is being developed. This method tries to minimize the pollution accumulation on the porcelain insulators without affecting their electrical properties. In this work the performance of two different thicknesses of the coating film on the porcelain insulators was evaluated by means of contact angle, adhesion, leakage current, dry-flashover voltage and erosion laboratory tests. Finally, the in-service behavior of coated and no-coated insulators installed in a power transmission tower was evaluated. The coated insulators showed a good performance in the laboratory tests. Moreover, before 5 months of exposure in the energized power line, a decrease in the soiling was observed.

----- *Keywords:* Atmospheric soiling, titanium dioxide, ceramic insulators

Introducción

El ensuciamiento de aisladores cerámicos en servicio expuestos a la atmósfera en circuitos de media y alta tensión constituye un gran inconveniente para el sector eléctrico, y se produce por la deposición de partículas del aire en los aisladores, las cuales pueden ser de origen natural o generadas por contaminación artificial como el resultado de actividades industriales, agrícolas o actividades relacionadas con la construcción [1-3]. La acumulación de partículas en la superficie del aislador en condiciones de sequedad tienen alta resistencia y baja corriente de fuga, pero al entrar en contacto con la humedad la resistencia disminuye y la corriente de fuga aumenta [4, 5], pudiendo causar diversos efectos como flameos continuos, perforación de la superficie del aislador, corrosión de las partes metálicas, entre otros [6, 7].

La tensión de flameo de un aislador contaminado disminuye considerablemente a medida que la

conductividad de la capa de contaminación aumenta. Este fenómeno es la principal causa externa de la ruptura de aisladores a tensión nominal. En general el flameo en las líneas de transmisión aéreas se define como la ruptura dieléctrica del aire en los alrededores de la superficie aislante. Las descargas iniciales siempre se desarrollan en el aire debido a que su rigidez dieléctrica es inferior a la del aislador [2, 8]. La lluvia no siempre proporciona la limpieza necesaria para combatir la contaminación, especialmente bajo condiciones de fuerte contaminación marina o industrial, o cuando la lluvia no es suficientemente regular. Dentro de las consecuencias generadas por el ensuciamiento de los aisladores, está el aumento en la frecuencia de los programas de mantenimiento en zonas de alta incidencia [8], lo que conlleva al aumento de costos por limpieza y reposición de los mismos. Además, los frecuentes cortes en el servicio incrementan las pérdidas y la incomodidad de los usuarios, afectando la competitividad de las empresas del sector.

Los planes comunes de mantenimiento preventivo incluyen el lavado con agua como la alternativa más utilizada [2]. Otras opciones involucran la aplicación de siliconas y grasas sobre la superficie del aislador antes de ser puestos en servicio. En términos generales, su durabilidad está entre seis meses y tres años [2, 6, 9]. La principal desventaja radica en la eliminación de la capa de grasa sucia antes de aplicar una nueva capa debido a que se pierden sus propiedades de viscosidad al incrementar la temperatura. Otras soluciones están más relacionadas con el diseño de los mismos aisladores, ya sea porque se sobredimensiona el aislamiento, porque se incrementa la distancia de fuga (distancia entre el extremo superior e inferior del aislador) o porque se modifica su perfil para reducir la deposición de partículas [10].

En este trabajo se evaluó un método innovador para evitar el ensuciamiento de los aisladores cerámicos, cuando éste es de naturaleza orgánica. Dicho método consiste en la aplicación de un recubrimiento permanente de dióxido de titanio con características hidrofílicas. Se evaluó la adherencia, el ángulo de contacto, el desempeño eléctrico mediante pruebas de corriente de fuga y de tensión de flameo, y la resistencia a la erosión en pruebas simuladas. Finalmente, se evaluó el desempeño de aisladores en servicio, en una torre de transmisión de energía ubicada en un sitio rural con alta incidencia de ensuciamiento biológico.

Parte experimental

Evaluación de adherencia

Sobre algunos aisladores se aplicó una capa de recubrimiento, mientras que en otros se aplicaron dos capas, para obtener dos espesores diferentes, siendo en ambos casos de orden nanométrico. Una vez obtenidos los recubrimientos, se evaluó la adherencia de acuerdo a la norma ASTM D 3359-02 [11], método B, y se observó el área de recubrimiento removido del sustrato con un microscopio óptico Nikon Eclipse E200.

Medición del ángulo de contacto

Las películas preparadas fueron expuestas a radiación UV para posteriormente evaluar su hidrofílicidad mediante el cambio del ángulo de contacto entre la gota de agua y la superficie de la película. La longitud de onda de la luz ultravioleta fue de 254 nm. Este ensayo se realizó empleando el método de la gota normalizado por la ASTM C813 [12]. Las superficies hidrofílicas atraen el agua, formando una película continua en la superficie, que fácilmente fluye por la misma removiendo y llevándose consigo el polvo y la suciedad [13 - 17].

Pruebas eléctricas

Los aisladores sin recubrir y con recubrimientos de una y dos capas se sometieron a pruebas de tensión de flameo en seco a frecuencia industrial y de corrientes de fuga bajo norma NTC 1285 [18], manteniendo las mismas condiciones de humedad relativa (~83%) y de temperatura (~23°C). Estas pruebas se realizaron para asegurar que los recubrimientos no afectaran las propiedades eléctricas de los aisladores, lo cual era un requisito indispensable para instalarlos en la torre energizada para su evaluación en campo. En la figura 1 se muestra el montaje para las pruebas de tensión de flameo y corrientes de fuga realizadas.



Figura 1 Montaje para realizar pruebas de tensión de flameo y corrientes de fuga

Ensayos de resistencia a la erosión

La resistencia a la erosión se evaluó mediante pruebas simuladas de laboratorio. Para ello, se tomaron muestras de 2x3 cm aproximadamente, extraídas de aisladores recubiertos con una y dos capas y de un aislador sin recubrir, con fines comparativos. El ensayo se realizó con base en la norma ASTM G76-07 [19]. Se utilizó una presión de 5 psi (equivalente a una velocidad de impacto de las partículas en la superficie de 3,1 m/s), con el propósito de lograr una velocidad en las partículas cercana a la velocidad del viento de la región donde serán instalados los aisladores, la cual tiene un valor promedio de 2.2 m/s. Como partículas erosivas se empleó arena de sílice compuesta principalmente por SiO_2 (95%), Al_2O_3 (0,60%) y Fe_2O_3 (0,12%) (figura 2), con un tamaño de partícula pasante de 106 μm y retenido de 90 μm , y una dureza entre 6 y 7 en la escala de Mohs. Las muestras fueron erosionadas a un ángulo de impacto de 90°, conservando una distancia entre la boquilla y la superficie de prueba de ~7.5 cm, bajo condiciones ambientales de temperatura (~25°C) y humedad relativa (~60%). Antes y después de la realización de las pruebas, las muestras se limpiaron con etanol y se pesaron en una balanza analítica Mettler Toledo AB204 con una sensibilidad de 0,001 g. Las pruebas de erosión se realizaron cada 10 segundos durante 7 ciclos. En cada ciclo se determinó la pérdida de masa como parámetro representativo del desgaste erosivo, estableciendo su evolución a lo largo de las pruebas. Para cada ensayo se realizaron 3 réplicas con el fin de comprobar su reproducibilidad.

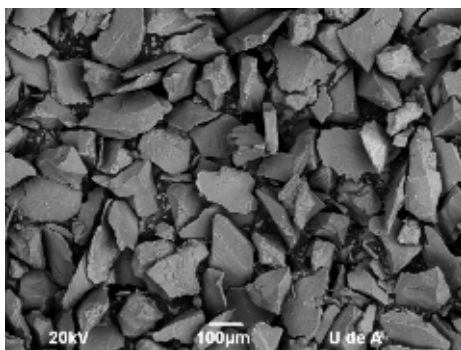


Figura 2 Morfología de las partículas de arena de sílice usadas en ensayo de erosión

Exposición en campo

Para la exposición en campo se eligió una torre de transmisión de energía ubicada en la Sabana de Bogotá, en una zona rural del municipio de Mosquera, Cundinamarca (línea Mosquera-Balsillas) (figura 3(a)). El sitio presenta alta humedad y fuertes corrientes de viento, lo que facilita el crecimiento de contaminantes orgánicos de tipo biológico -principalmente algas- (figura 3(b)). Se instalaron cadenas de aisladores con y sin recubrimiento en dicha torre, y se realizó una evaluación visual de los mismos después de cinco meses de exposición.



(b)

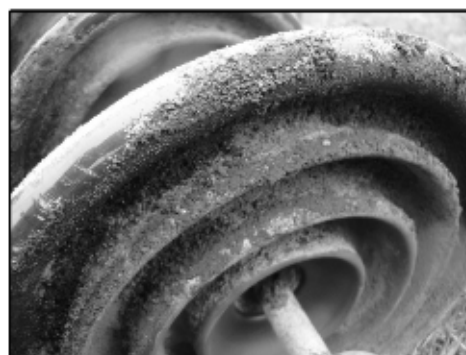


Figura 3 (a) Torre elegida para la evaluación en campo, en la línea Mosquera – Balsillas; (b) ensuciamiento biológico de aisladores retirados de esta torre

Resultados y discusión

El principal reto para desarrollar alternativas de protección contra el ensuciamiento de los aisladores radica en encontrar soluciones con una buena durabilidad, con el propósito de reducir la frecuencia de las acciones de mantenimiento. En las torres de transmisión y distribución de energía eléctrica del país, este tipo de maniobras implica una compleja logística para que el servicio tenga la menor afectación posible, lo cual eleva en gran medida los costos, sobre todo en zonas de difícil acceso.

Una propiedad que está íntimamente ligada a la durabilidad de un recubrimiento es la adherencia al sustrato. En el caso de los recubrimientos, la norma ASTM D 3.359-02 establece una escala de adherencia que varía entre 0B (área removida mayor que 65%) hasta 5B (área removida: 0%) [11]. Para ambos espesores de recubrimiento se obtuvo un porcentaje de área removida de 0%, y una clasificación de 5B, lo cual indica que posee una alta adherencia al sustrato. La alta adherencia de estos recubrimientos se debe al método de síntesis de la película, a la técnica de aplicación y al cuidadoso tratamiento térmico empleado para lograr la sinterización de la película. Así mismo, a la naturaleza del sustrato, que es un cerámico porcelanizado, por lo que se puede afirmar que el mecanismo de adhesión del recubrimiento es pre-

dominantemente químico. Con el procedimiento desarrollado, se ha conseguido obtener un recubrimiento de alta adherencia en un sustrato que posee una rugosidad extremadamente baja.

Una condición indispensable para que el recubrimiento logre evitar la acumulación de suciedad es que posea propiedades hidrofílicas, dicha característica se logra cuando el ángulo de contacto entre la superficie y el agua es menor que 30°. Las propiedades hidrofílicas de las películas depositadas y tratadas térmicamente a 400° se ilustran en la figura 4, el ángulo de contacto disminuye drásticamente desde los primeros minutos de irradiación UV. Luego de 50 min, la disminución es menos abrupta y durante el resto del tiempo de ensayo se mantiene aproximadamente constante. Los valores de ángulo de contacto finales obtenidos para las muestras fueron de 20° y 10° para los recubrimientos de 1 capa y 2 capas, respectivamente. Estos resultados, además de confirmar que las superficies son super-hidrofílicas, demuestran que tal condición requiere de un buen sinterizado y cristalización de la película. De igual manera, de los resultados obtenidos se evidenció que a mayores espesores de película, mayor hidrofílicidad de superficie, lo que se traduce en una mayor activación fotocatalítica, lo que es coherente con la literatura y es el objetivo último de dicho recubrimiento [13-17].

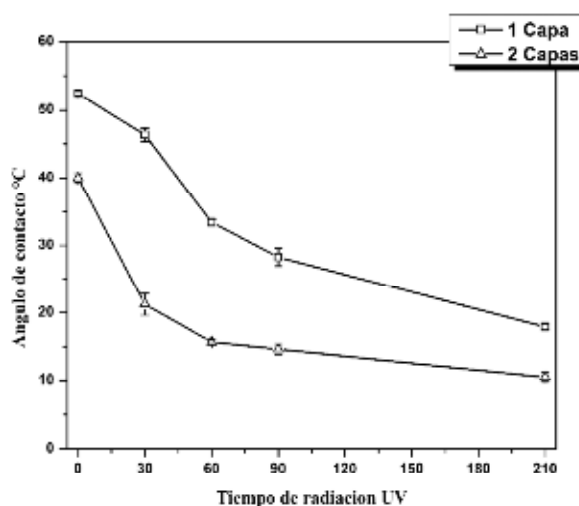
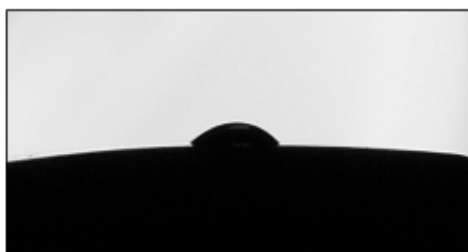


Figura 4 Medición de ángulo de contacto sobre el aislador recubierto

Las pruebas eléctricas de tensión de flameo y corrientes de fuga se realizaron en aisladores con 1 y 2 capas de recubrimiento. En la tabla 1 se presentan los valores de tensión de flameo obtenidos para 2 aisladores de cada condición,

donde la condición A corresponde al aislador de 1 capa y la B corresponde al aislador de 2 capas. Además, se incluye la evaluación de un aislador sin recubrir con fines comparativos.

Tabla 1 Tensiones de flameo de los aisladores

<i>Aisladores</i>	<i>Tensión de flameo en seco (kV)</i>						<i>Desviación Estandar</i>
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>Promedio</i>	
Sin recubrimiento	55,6	54,8	54,9	55,7	55,6	55,32	0,4324
A1	59,1	58,9	61,5	60,1	62,8	60,4	1,6559
A2	63,5	63,1	62,1	61,5	61,7	62,38	0,8786
B1	58,6	58,5	57,9	62	59,8	59,3	1,6288
B2	61,7	61,5	61,4	61,2	61,6	61,48	0,1924

De acuerdo con los valores promedio de tensión de flameo incluidos en la tabla 1, la presencia del recubrimiento en los aisladores no desmejora el desempeño eléctrico cuando estos son sometidos a la tensión nominal de servicio; por el contrario, soportan mayor tensión de flameo que los no recubiertos, en porcentajes de aproximadamente 9,4% para el aislador con espesor A (1 capa) y de 7,2% para el de espesor B (2 capas), con respecto a la tensión del aislador sin recubrimiento.

Con el fin de observar el comportamiento de los recubrimientos aplicados en cuanto a las corrientes de fuga, se varió la tensión de energización entre aproximadamente 0 y 43 kV rms. Las corrientes de fuga registradas para los aisladores recubiertos son menores que para los no recubiertos (figura 5). Para la tensión de 40 kV la corriente se reduce en un 28,3% con respecto a las corrientes obtenidas con el aislador sin recubrimiento. Cabe anotar que este tipo de recubrimiento, de acuerdo a la literatura consultada, no ha sido aplicado sobre aisladores cerámicos, por lo cual no se tiene información con la que se puedan sustentar

dichos resultados. Sin embargo, las pruebas fueron aplicadas bajo norma y los datos aquí plasmados fueron obtenidos de dicha evaluación experimental.

De acuerdo con los resultados anteriores, la presencia del recubrimiento sugiere una mejora en las propiedades eléctricas evaluadas. La variación en el espesor no influye en forma significativa en dichas propiedades.

El desgaste erosivo fue valorado cuantitativamente mediante la pérdida de masa en función del tiempo de duración de la prueba (figura 6). Se observa claramente una pérdida de masa progresiva con un comportamiento bastante cercano al lineal. El valor de pérdida de masa de las muestras con recubrimiento tiende a estabilizarse al final de la prueba, indicando que se está alcanzando un régimen de desgaste estable, mientras que en la muestra sin recubrimiento se sigue incrementando este valor. Para el sustrato sin recubrimiento, se observa un mayor incremento en la tasa de desgaste con respecto al tiempo de ensayo, si se compara con los aisladores recubiertos.

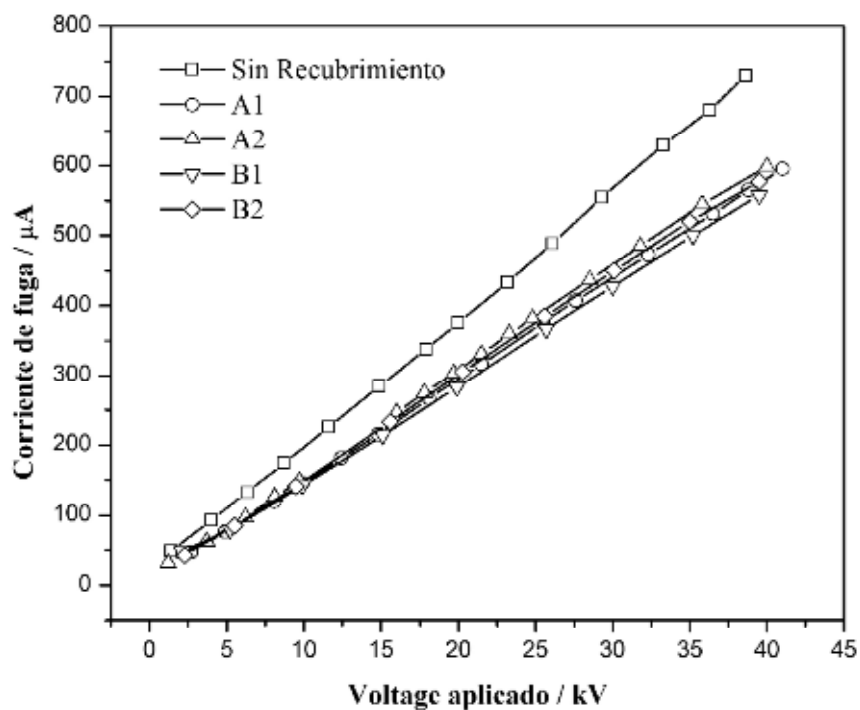


Figura 5 Resultado de los ensayos de corrientes de fuga para aislador sin recubrimiento: (A) una capa y (B) dos capas

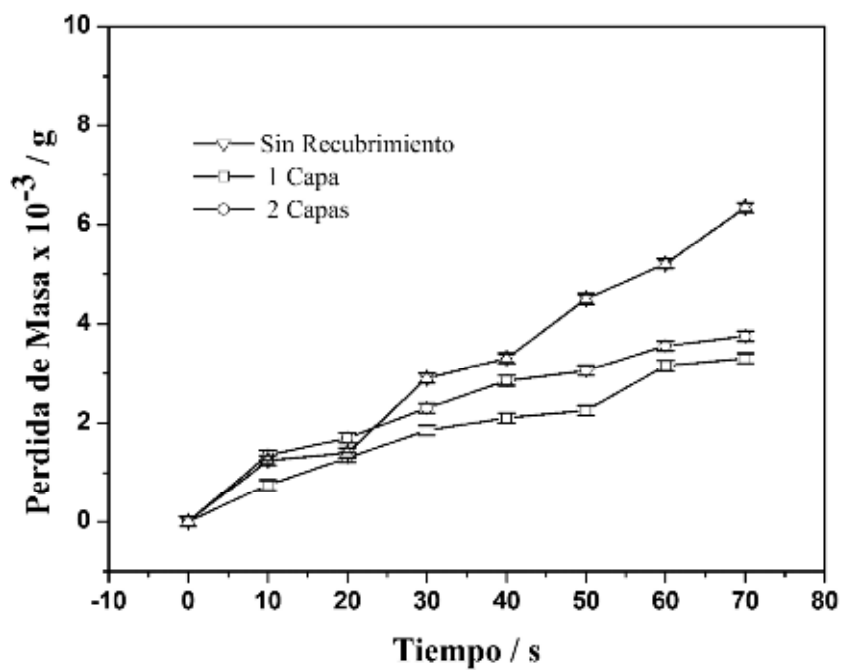


Figura 6 Pérdida de masa en ensayos de erosión a 5 psi

En la figura 7, se observa para un periodo de ensayo de 40 s una huella de desgaste menor, con forma circular, con contornos bien definidos. Para 70 s de evaluación frente al desgaste erosivo, se presentan huellas similares, de geometría circular bien definida. Aunque la diferencia entre las huellas de desgaste generadas en el material después de la prueba a 40 s y 70 s es pequeña, la agresividad del ensayo no sólo se mide en el diámetro sino también en la profundidad de la huella, lo cual no se logra observar en las figuras presentadas. En general, los resultados obtenidos muestran que el recubrimiento de dióxido de titanio presenta una pérdida de masa alrededor del 50 % inferior a la del aislador sin recubrimiento cuando se utilizan velocidades cercanas a las del viento. Estos

resultados son promisorios para implementar industrialmente estos recubrimientos, ya que a pesar de los pequeños espesores aplicados mostraron una mejor resistencia al desgaste erosivo que el sustrato, debido a su buena adherencia y elevada dureza. Se puede decir que los aisladores recubiertos tienen unas expectativas de vida similares que las del esmalte original del aislador, con base en los resultados obtenidos. Se sugiere una mayor protección de la superficie con los recubrimientos aplicados, porque aparte de brindar protección contra el ensuciamiento, cubre el esmalte del aislador de los daños que se puedan presentar por acción del viento cargado de material particulado. Las diferencias medidas entre recubrimientos con una y dos capas no se consideran significativas.

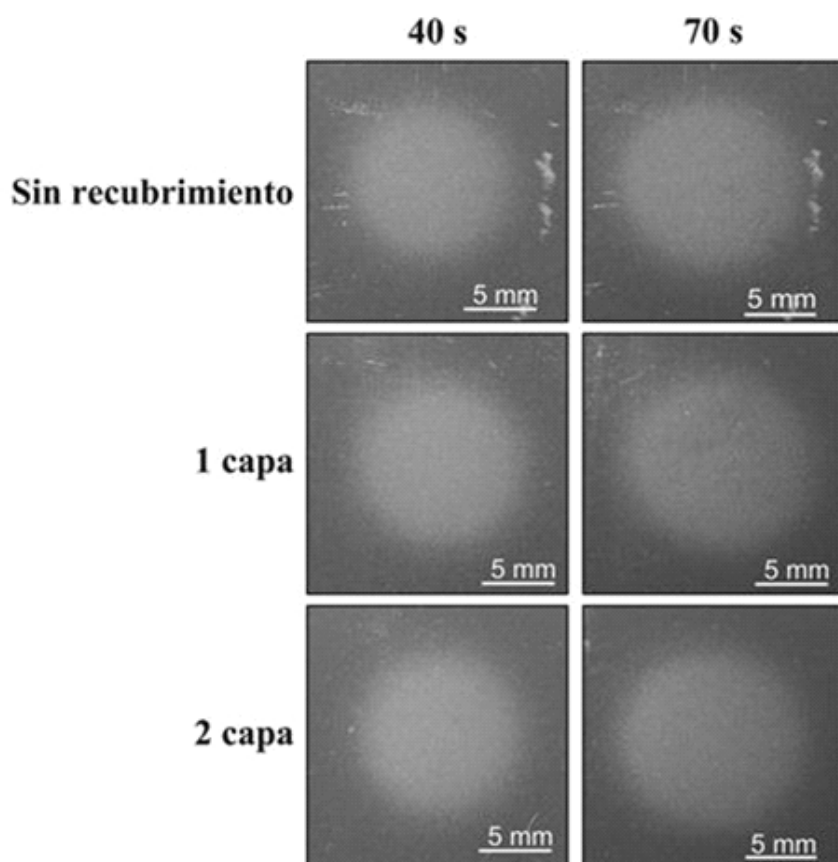


Figura 7 Aspecto superficial del cerámico tras ensayos de erosión a 5 psi

Al no observarse una desmejora en las propiedades eléctricas del aislador recubierto, que pudiese producir fallos y poner en peligro la integridad del sistema de distribución eléctrica, se dio vía libre a la evaluación de aisladores recubiertos en condiciones de servicio en líneas energizadas. Tras 5 meses de exposición, se retiraron aisladores sin recubrir y recubiertos con una y dos capas. Los aisladores recubiertos se encontraron

limpios, brillantes y con buen aspecto superficial. No se observaron diferencias apreciables entre aisladores con una y dos capas de recubrimiento. Por su parte, los aisladores instalados durante el mismo periodo de tiempo sin recubrimiento presentaban ensuciamiento en la zona de los surcos (figura 8). De esta manera, se corroboró que los aisladores recubiertos reducen la acumulación de contaminación en el período evaluado.

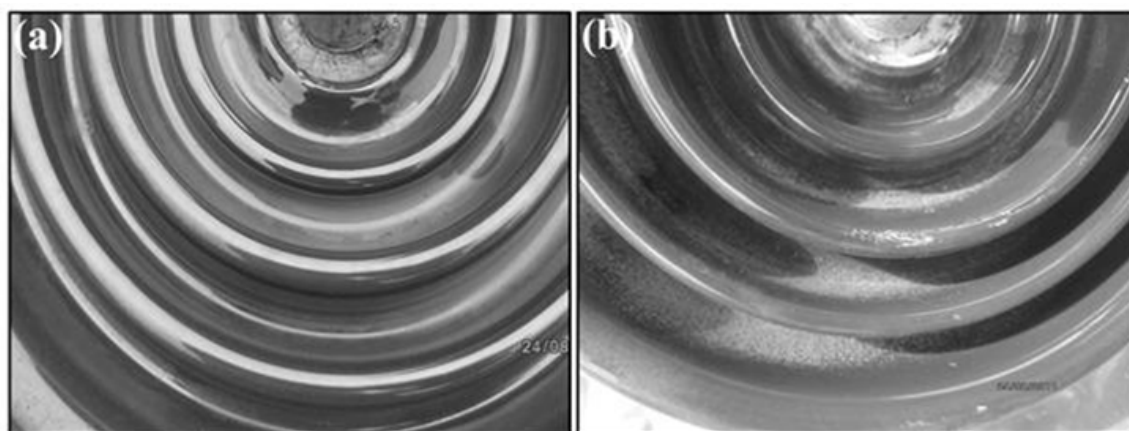


Figura 8 Aisladores evaluados en servicio por un periodo de cinco meses. (a) Aislador con recubrimiento de TiO_2 , (b) Aislador sin recubrimiento

Conclusiones

Los recubrimientos aplicados presentan propiedades hidrofílicas y una buena adherencia. Además, las pruebas en campo en la torre muestran que efectivamente reducen la acumulación de suciedad, por lo cual este tipo de recubrimiento se puede considerar como adecuado para disminuir el ensuciamiento en aisladores de porcelana utilizados en sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica en ambientes con ensuciamiento de origen orgánico.

Comparando los resultados de todos los ensayos eléctricos realizados, se puede identificar que los valores de corriente de fuga disminuyen en los aisladores recubiertos, mientras que la tensión de flameo aumenta en los mismos, en comparación con aisladores sin recubrimiento, lo cual indica que hay un mejoramiento en el comportamiento eléctrico de estos elementos como resultado de la capa aplicada.

Los resultados de los ensayos de erosión muestran que a velocidades cercanas a la velocidad del viento, el aislador recubierto con dióxido de titanio presenta una pérdida de masa alrededor del 50 % inferior a la del aislador sin este recubrimiento, lo que sugiere una expectativa de vida del recubrimiento superior a la del esmalte original del aislador.

El espesor del recubrimiento tiene poca incidencia en su comportamiento, y con sólo una capa se consigue un buen desempeño, lo cual hace más atractivo el proceso pensando en un escalamiento industrial.

Agradecimientos

Agradecimientos especiales a Colciencias, CODENSA S.A. E.S.P., EMGESA S.A. E.S.P. y Universidad de Antioquia, por la financiación del Proyecto (código 1115-498-26376).

Referencias

1. J. LaForest. *Transmission line reference book, 345 kV and above*. "Electric Power Research Institute EPRI". Second Edition. Ed. Palo Alto, California. 1982. pp. 350-420.
2. A. Haddad, D. Warne. *Advances in High Voltages Engineering*. "IET Power and Energy Series". First Edition. Ed. The Institution of Engineering and Technology. United Kingdom. 2009. pp. 257-279.
3. C. Bayliss, B. Hardy. "Transmission and Distribution Electrical Engineering". Ed. Elsevier. Third Edition. Oxford. 2007. pp. 163-180.
4. M. Sforzini. "Testing of Polluted Insulators-The Present Situation and Problems of the Future". *The Franklin Institute*. Vol. 6. 1972. pp. 437-468.
5. G. Muhsin, C. Mehmet. "The Pollution Flashover on High Voltage Insulators". *Electric Power Systems Research*. Vol. 78. 2008. pp. 1914-1921.
6. L. Hencker. "Consideraciones en la selección de aisladores bajo condiciones de contaminación atmosférica". *Boletín Técnico GAMMA Corona*. Vol. 5. 2005. pp. 1-10.
7. S. Abdus, G. Hemen, N. Zia. "Determination of equivalent salt deposit density using wind velocity for a contaminated insulator". *Journal of Electrostatics*. Vol. 63. 2005. pp. 37-44.
8. M. Abdel, A. El-Morshedy, R. Radwan. *High-voltage engineering: theory and practice*. "Electrical Engineering and Electronics". Second Edition. Ed. Taylor & Francis. New York. 2000. pp. 350-356.
9. A. Cano. "Guía para la selección de aisladores bajo condiciones de contaminación". *Boletín Técnico GAMMA Corona*. Vol. 36. 2006. pp. 1-12.
10. F. Gonzalez. "Elementos de Líneas de Transmisión Aéreas". Reporte de Investigación. Capítulo 1. 2007. pp. 1-53.
11. ASTM. "Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test. West Conshohocken". Pennsylvania. ASTM (Norma: ASTM D 3359-02). 2002. pp. 1-7.
12. ASTM. "Standard Test Method for Hydrophobic Contamination on Glass by Contact Angle Measurement". West Conshohocken. Pennsylvania. ASTM (Norma: ASTM C 813). 2009. pp. 1-3.
13. P. Forbes. "Self-Cleaning Materials". Scientific American. August 2008, (<http://www.sciam.com/article.cfm?id=self-cleaning-materials>). Consultado 2009.
14. W. Abdallah, J. Buckley, A. Carnegie, J. Edwards, E. Fordhman, A. Graue. "Fundamentos de la mojabilidad". Seminario Schlumberger sobre mojabilidad. *Oilfield Review*. Vol. 19. 2007. pp. 48-67.
15. D. Menéndez, M. Miguez, A. Gomez. "Determinación del ángulo de contacto de un líquido sobre un sólido mediante una técnica de digitalización de imagen". Investigación Aplicada Procesos superficiales. 5º Jornada de Desarrollo e innovación. Instituto Nacional de Tecnología Industrial. 2004. pp. 1-2.
16. H. Abdullah, H. Taib, C. Sorell. "Coating methods for self-cleaning thick films of titania". *Advances in Applied Ceramics*. Vol. 106. 2007. pp. 105 - 112.
17. B. Roland, D. Frank, Q. Jana, O. Marko. "Application of Titanium Dioxide Photocatalysis to Create Self-Cleaning Building Materials". *Lacer*. Vol. 5. 2000. pp. 157-168.
18. NTC. "Método de ensayo para aisladores de potencia eléctrica". Norma Técnica Colombiana Electrotécnica. Colombia. NTC (Norma: NTC 1285). 2002. pp. 1-30.
19. ASTM. "Standard Test Method for Conducting Erosion test by Solid Particle Impingement Using Gas Jets. West Conshohocken". ASTM (Norma: ASTM G76). 2007. pp. 1-6.