

Efecto de la humedad relativa sobre las tensiones de flameo en aisladores de EPDM sujetos a contaminación

Primo-Alberto Calva-Chavarría
Alberto-Rafael Portillo-Méndez
Víctor-Manuel Salazar-del-Moral
J. M. de-la-Rosa-Vázquez

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Instituto Politécnico Nacional. Unidad Profesional "Adolfo
López Mateos", Av. Instituto Politécnico Nacional,
Col. Lindavista C.P. 07738, México D.F.
MÉXICO.

correo electrónico: pcalva@ipn.mx

Recibido el 9 de noviembre de 2005; aceptado el 9 enero de 2006.

1. Resumen

En este artículo se reportan resultados obtenidos en la evaluación de aisladores eléctricos de Monómero Dieno de Etileno Propileno (EPDM) sometidos a contaminación y diferentes niveles de niebla limpia, a una altitud de 2240 msnm. Se analiza el efecto de la humedad relativa sobre las tensiones de flameo. Se muestra que el incremento de la humedad en niveles de contaminación ligeros y medios, provoca que la tensión de flameo tienda a disminuir. Sin embargo, cuando la contaminación es alta, los cambios de humedad no afectan a la tensión de flameo. Se muestra que el índice de arqueo es igual a 0.3.

Palabras clave: humedad relativa, contaminación, niebla limpia, tensión de flameo, aisladores EPDM, índice de arqueo.

2. Abstract (Effect of the relative humidity about the flashover voltages on insulators of EPDM under pollution)

In this paper results about an evaluation on electric insulators of EPDM under pollution and clean fog are reported. The tests were carried out at 2240 meters at sea level. The effect of relative humidity about the flashover voltage was analyzed. The results

show that an increase of humidity on light and medium pollution levels provides that flashover voltage trends to diminish. Nevertheless, when the contamination is heavy, humidity changes do not affect the flashover voltage. It was demonstrated that the arc index is equal to 0.3.

Key words: relative humidity, pollution, clean fog, EPDM insulators, arc index.

3. Introducción

Aunque muchos factores están involucrados en el comportamiento eléctrico de los materiales no cerámicos, la humedad, la contaminación y la exposición a la luz ultravioleta juegan los papeles más importantes. Los mecanismos de flameo están en función de las propiedades superficiales, tal como su hidrofobicidad. La humedad, la contaminación y la oxidación provocan un incremento en la corriente de fuga sobre la superficie del aislador. A su vez la corriente de fuga indica la pérdida de hidrofobicidad y si es suficientemente alta, puede producir arqueos en bandas secas. El calor producido por las descargas causa erosión y degradación superficial, acelerando en consecuencia el envejecimiento.

En el caso de aisladores no cerámicos, no existe una guía estandarizada para su evaluación en laboratorio y, consecuentemente, se emplean los mismos métodos que en los convencionales. En este artículo se presenta una investigación sobre la influencia de la humedad relativa en la tensión de flameo, de aisladores poliméricos de EPDM en corriente alterna, evaluados en una cámara de contaminación artificial con niebla limpia y sometidos a diferentes niveles de contaminación.

4. Desarrollo

De la amplia gama de aisladores no cerámicos, los que han demostrado tener un mejor comportamiento a la formación de bandas secas, a la erosión y al envejecimiento, en condiciones de contaminación, son los de hule silicón y los de EPDM. La superficie de un faldón de EPDM se vuelve hidrofílica después de un periodo expuesto a condiciones de contaminación y

humedad, y se ha identificado que el mecanismo de flameo de los aisladores de EPDM es muy parecido al de los aisladores de porcelana [1].

Con el propósito de conocer el efecto de la humedad relativa sobre las corrientes de fuga y las tensiones de flameo, se llevaron a cabo pruebas de laboratorio en 4 aisladores nuevos de EPDM, clase 15, contaminados con los 4 niveles descritos en la Norma IEC-507 [2] en función de la Densidad Equivalente de Sal Depositada, en mg NaCl/cm^2 (DESD). Como se trata de materiales hidrofóbicos se empleó un método de contaminación no convencional que ha resultado satisfactorio en pruebas anteriores, en lo que a los requisitos de representatividad, repetibilidad y reproducibilidad se refiere [3].

4.1 Metodología

Primero, se acondicionó una cámara de niebla limpia a fin de obtener un valor de humedad, dentro de la cámara, el mínimo posible se alcanzó en el intervalo de 50-60%. Se colocó al centro de la cámara el aislador a evaluar, previamente contaminado y se aplicó una tensión creciente de c.a. hasta que se produjera el flameo. Una vez logrado lo anterior se limpió inmediatamente con agua para remover los residuos de la mezcla contaminante y se dejó secar, para contaminarse nuevamente con el mismo nivel y colocarlo en la cámara con una humedad comprendida en el intervalo 60-70%. Se llevó el aislador al flameo. Nuevamente el aislador se limpió y secó, se contaminó y se probó, pero ahora con una humedad comprendida entre 70-80%. Finalmente, el aislador se sometió a este mismo proceso, pero con el intervalo de humedad de 80-90%. Este procedimiento se realizó sobre otros tres aisladores, para otros tres niveles de contaminación.

En cada una de las pruebas, se registraron los valores de tensión de flameo y de corrientes de fuga. Asimismo se realizó una observación visual de los aisladores al final de las pruebas, con el fin de determinar sobre cuales faldones se habían generado más bandas secas.

Los resultados en cada una de las etapas son producto de las condiciones más severas debido a que no se permitió tiempo de secado entre la aplicación de las mezclas contaminantes y el inicio de las pruebas. Esto representa el peor escenario posible para el comportamiento del flameo en condiciones reales de operación.

El diagrama esquemático del arreglo experimental se muestra en la figura 1.

Para la medición de la corriente de fuga, se utilizó un Sistema de Adquisición de Datos (SAD) [4], el cual se compone de un circuito derivador, un circuito de protección, un circuito offset, un microprocesador y una computadora personal. Los valores

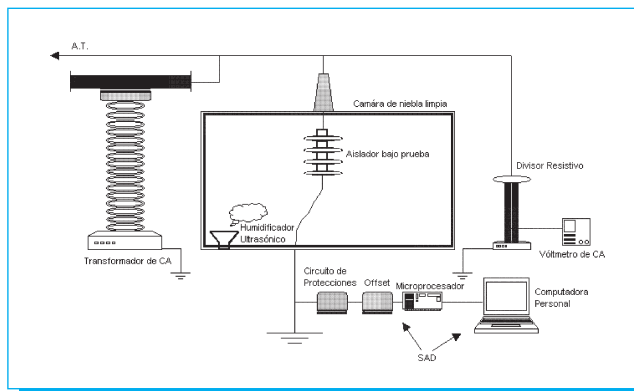


Fig. 1. Arreglo experimental para un arreglo de niebla limpia.

de la resistencia en el circuito derivador fueron del orden de 2.5-3.0 Ω . A la salida del derivador (*shunt*) se conectó un circuito de protección. Este circuito consiste de tres etapas: en la primera, se conectó un supresor de gas, en la segunda etapa se conectó en paralelo un diodo zener y en la tercera, un amplificador protegido también contra picos de sobrecorrientes que pudieran presentarse. La señal registrada durante las pruebas tomó valores positivos y negativos. Debido a que el microprocesador sólo acepta valores positivos y menores a 5 V, a la salida del circuito de protección se conectó un circuito offset, el cual, mediante un convertidor, logró que la señal tomara únicamente valores positivos, y dentro de los valores de tensión permitidos. El offset se conectó a un microprocesador 68HC11. El sensor del procesador es de 16 bits, por lo que se tuvo un registro de la señal de 16 puntos por ciclo. Esto es, 960 puntos por segundo.

El microprocesador envió los datos a una computadora, y mediante un software comercial [5] se graficaron los valores de corriente de fuga contra el tiempo, y también se obtuvieron los espectros de frecuencia de las corrientes.

4.2 Resultados obtenidos y análisis

De la figura 2 a la figura 17 se pueden apreciar las corrientes de fuga medidas. Específicamente en la figura 2 b) se muestra el espectro de frecuencia donde se aprecia principalmente la presencia de la tercera y quinta armónicas. La tercera armónica fue siempre insignificante en la corriente de fuga hasta el inicio del primer arqueo sobre la superficie, lo cual concuerda con [6].

Las gráficas de las figuras 2, 3, 4 y 5 corresponden a las pruebas para una contaminación ligera. En 56% de humedad relativa, la corriente de fuga se mantuvo entre 20-30 mA y

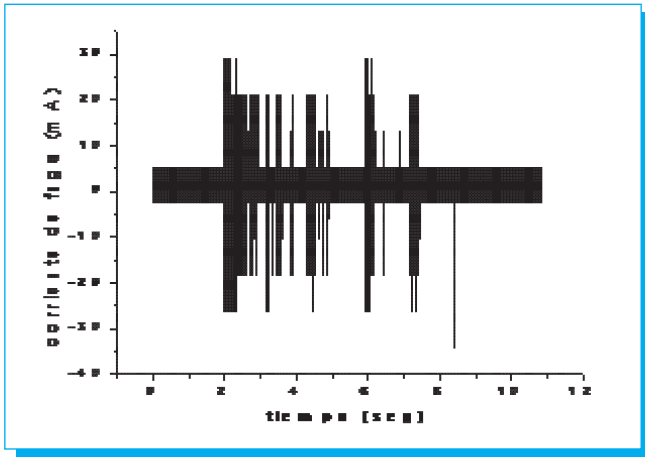


Fig. 2a. Tensión de flameo $V_b = 22.6$ kV, temperatura = 20°C, una humedad relativa $RH = 56\%$ y $DESD = 0.02$ mg/cm².

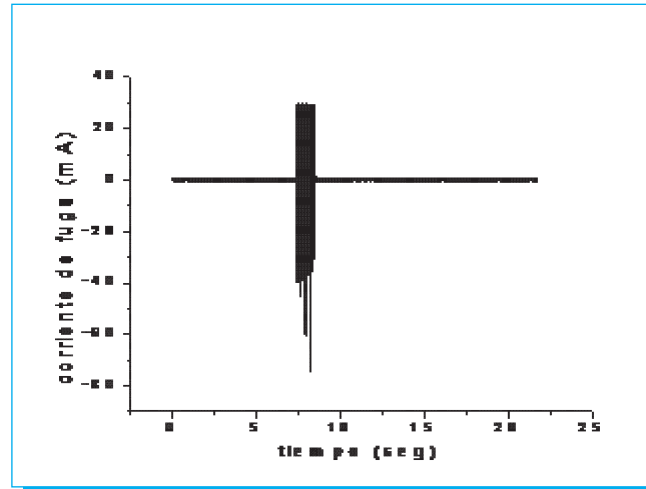


Fig. 3. $V_b = 18.6$ kV, temperatura = 23°C, $RH = 68\%$ y $DESD = 0.02$ mg/cm².

la tensión de flameo fue de 22.6 kV. En 68%, la corriente aumento a valores comprendidos entre 20-40 mA, aunque se alcanzaron picos de mayor magnitud, y la tensión disminuyó un 17.6% del valor obtenido previamente, llegando a los 18.6 kV. Cuando se probó el aislador con 79% de humedad, la tensión de flameo fue de 16.8 kV, decreciendo un 9.6%. La corriente se mantuvo en un intervalo de entre 40-50 mA, y se presentó un pico de 70 mA. Finalmente, en 86% la corriente estuvo entre 40-70 mA y la tensión disminuyó 10.11%, siendo de 15.1 kV. Se observó que a medida que se incrementó la humedad, la tensión de flameo tendió a decrecer, y las corrientes de fuga aumentaron. Esto concuerda con lo reportado [7].

Las gráficas de las figuras 6, 7, 8 y 9 corresponden a las pruebas para una contaminación media. Se observó también que la tensión de flameo disminuyó conforme la humedad se incrementó. En 58% de humedad relativa, el aislador flameó en 13.8 kV, siendo la corriente de fuga del orden de 20-35 mA. Cuando la humedad subió a 68%, la tensión disminuyó a 13.1 kV. Esta disminución fue del 5%. El valor de la corriente de fuga fue de 20-40 mA. En 76% de humedad, el flameo se

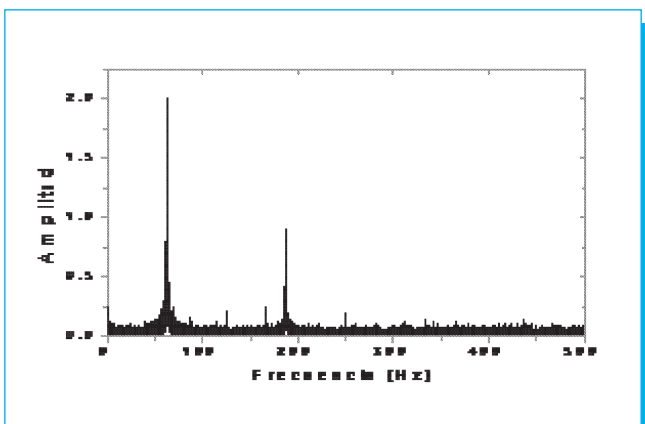


Fig. 2b. Espectro de frecuencia correspondiente a la figura 2a.

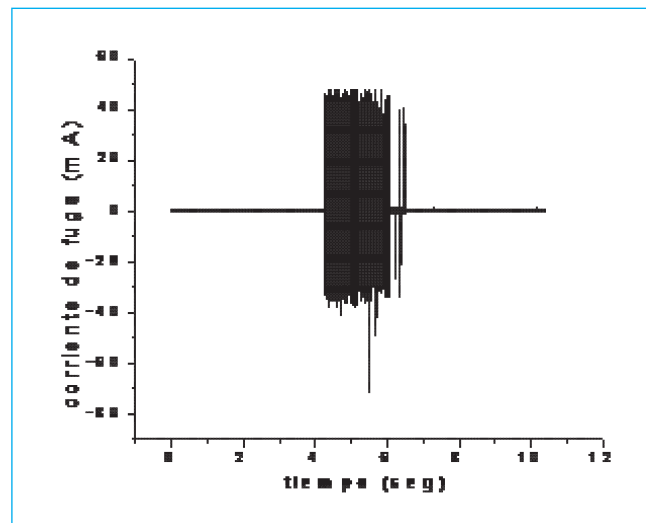


Fig. 4. $V_b = 16.8$ kV, temperatura = 22°C, $RH = 79\%$ y $DESD = 0.02$ mg/cm².

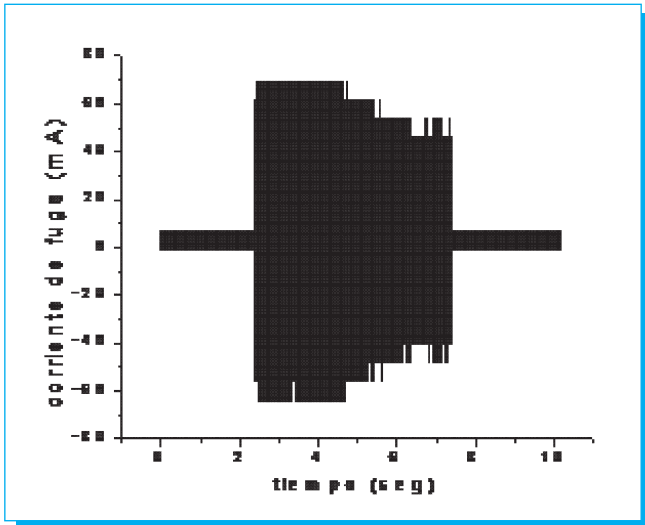


Fig. 5. $V_b = 15.1$ kV, temperatura = 20°C, $RH = 86\%$ y $DESD = 0.02$ mg/cm².

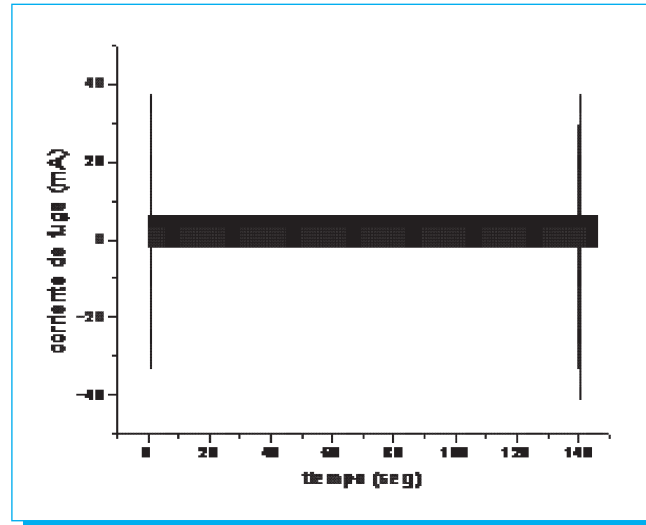


Fig. 7. $V_b = 13.1$ kV, temperatura = 20°C, $RH = 68\%$ y $DESD = 0.075$ mg/cm².

presentó en 11.8 kV, disminuyendo 9.9% del valor obtenido con la humedad anterior. El valor de corriente se mantuvo entre 30-45 mA. Por último, en 90% de humedad, la corriente fue del orden de 40-50 mA y la tensión disminuyó 10.1%, llegando a los 10.6 kV.

Para la contaminación pesada, la tensión de flameo fue de 9.2, 10.2, 9.2 y 12.3 kV en 54, 68, 79 y 85% de humedad, respectivamente. Como se observa, en este último intervalo de humedad, la tensión de ruptura fue mayor. Para corroborar

este valor, la prueba se repitió dos veces más, obteniéndose resultados similares en ambos casos. Esto coincide con lo reportado por Fernando y Gubanski [8]. En su artículo señalan que en presencia de una alta conductividad, generada por una contaminación alta o pesada y una alta humedad, la tensión de flameo tiende a ser irregular. Asimismo, las corrientes de fuga, según las figuras 10, 11, 12 y 13 se mantuvieron entre 20-40, 30-40 y 40-45 mA, para los tres

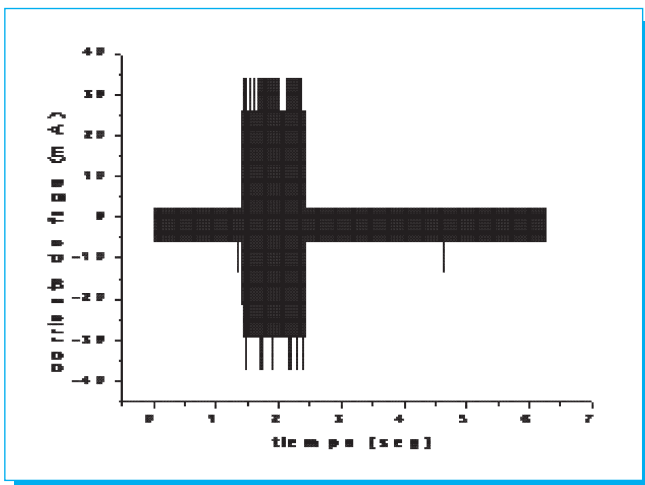


Fig. 6. $V_b = 13.8$ kV, temperatura = 22°C, $RH = 58\%$ y $DESD = 0.075$ mg/cm².

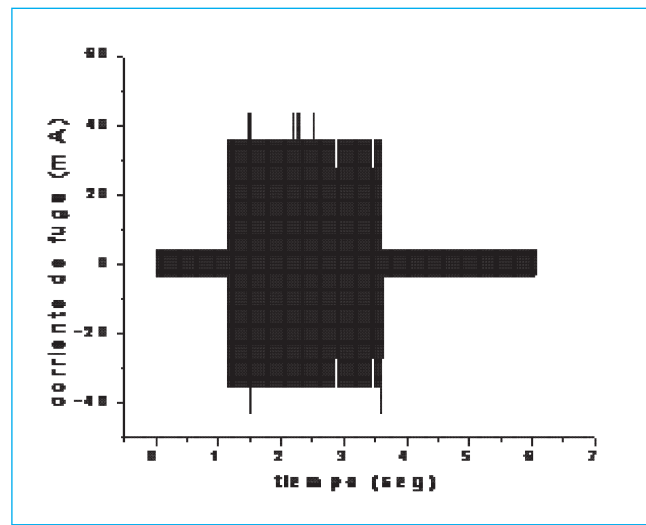


Fig. 8. $V_b = 11.8$ kV, temperatura = 22°C, $RH = 76\%$ y $DESD = 0.075$ mg/cm².

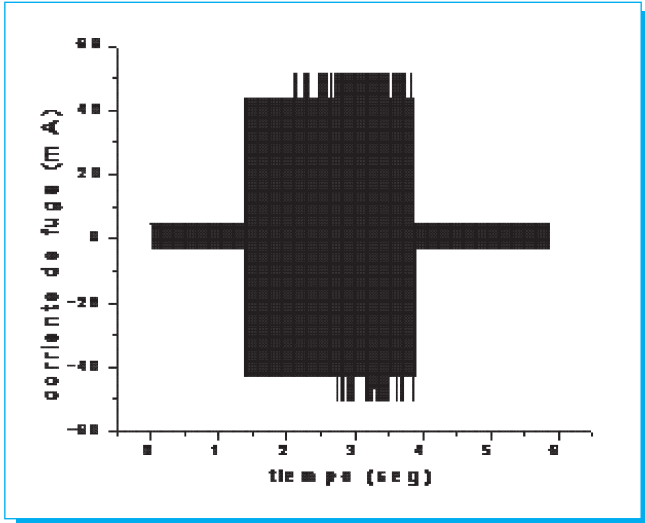


Fig. 9. $V_b = 10.6$ kV, temperatura = 20°C, RH = 90% y DESD = 0.075 mg/cm².

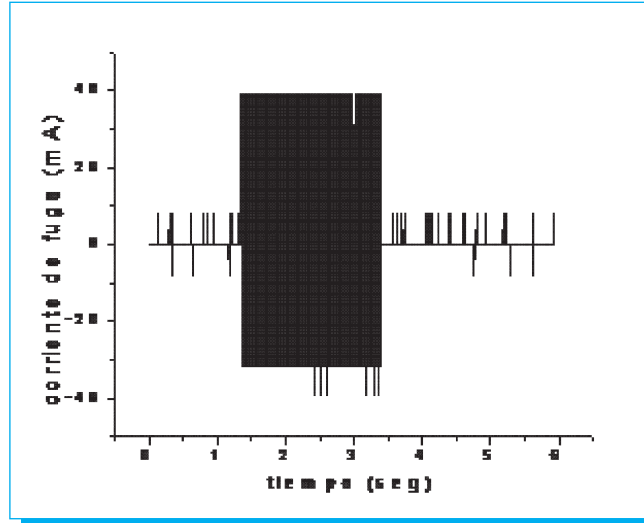


Fig. 11. $V_b = 10.2$ kV, temperatura = 23°C, RH = 68% y DESD = 0.25 mg/cm².

primeros intervalos de humedad y del orden de 50 mA, con picos cercanos a los 200 mA, para la humedad más alta.

En la evaluación con una contaminación muy pesada, el flameo del aislador se presentó en 6.3 kV, en los intervalos de humedad de 53, 63, y 75%; sólo en 87%, la tensión fue de 8.5 kV. Nuevamente, y como se mencionó en el párrafo anterior, el comportamiento de la tensión se vuelve irregular cuando se

tienen condiciones de alta contaminación y una alta humedad. La corriente de fuga se mantuvo entre 20-35 mA, sólo en 63% se presentó un pico de casi 80 mA, en 75% un pico cercano a los 60 mA y en 87% se presentaron algunos pulsos de corriente entre 60-120 mA. Ver figuras 14, 15, 16 y 17.

Dado que la capa contaminante tiene un coeficiente térmico negativo, la resistencia superficial decreció lentamente

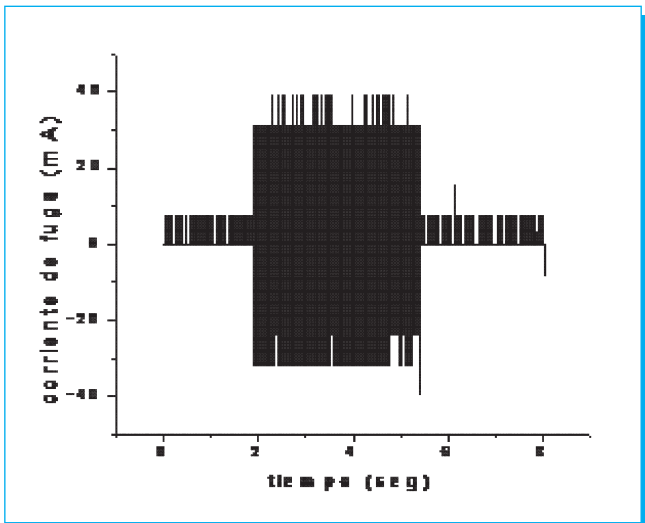


Fig. 10. $V_b = 9.2$ kV, temperatura = 20°C, RH = 54% y DESD = 0.25 mg/cm².

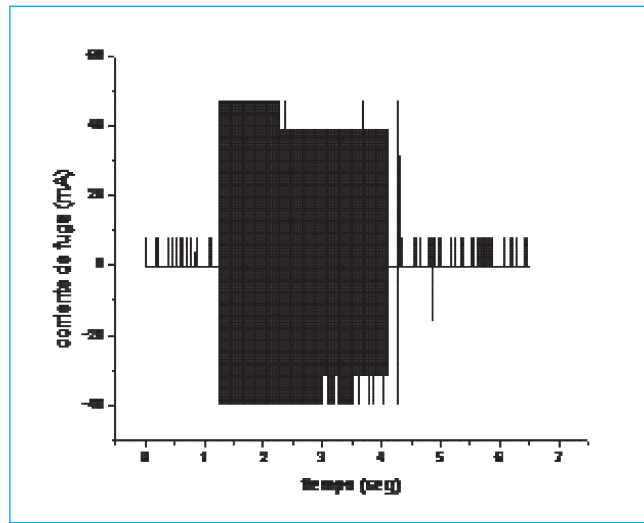


Fig. 12. $V_b = 9.2$ kV, temperatura = 21°C, RH = de 79% y DESD = 0.25 mg/cm².

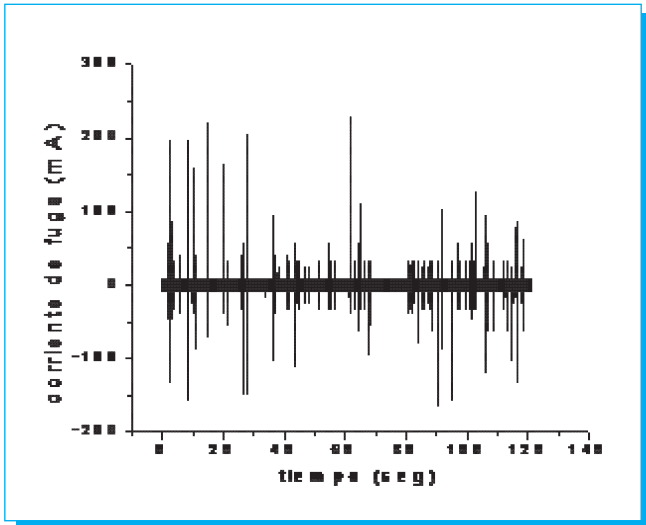


Fig. 13. $V_b = 12.3$ kV, temperatura = 23°C, RH = de 85% y DESD = 0.25 mg/cm².

debido al calentamiento por el efecto Joule; simultáneamente el secamiento y la pérdida de la humedad sobre la superficie del aislador incrementaron la resistencia superficial. Estos dos fenómenos buscaron el equilibrio en un nivel bajo de corriente de fuga, lo cual puede apreciarse en los valores obtenidos de las gráficas anteriores.

Una observación visual después de las pruebas reveló bandas secas grandes en el núcleo y entre los tres primeros faldones

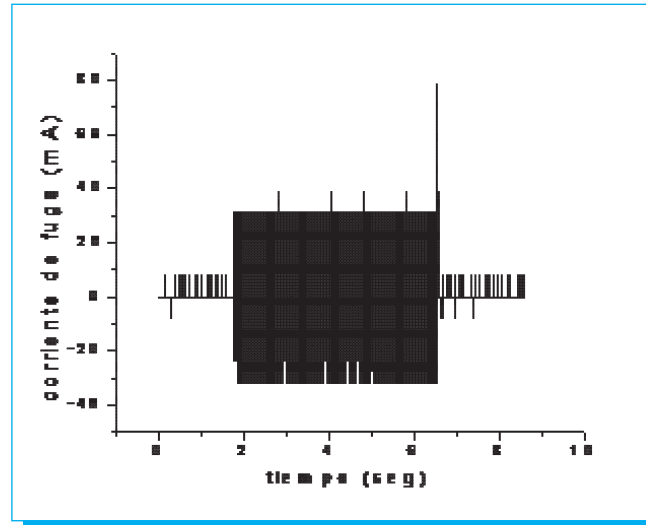


Fig. 15. $V_b = 6.3$ kV, temperatura = 22°C, RH = 63% y DESD = 0.425 mg/cm².

de los aisladores. Aunque en el preconditionamiento la contaminación fue distribuida uniformemente sobre la superficie del aislador, al término de la prueba la cantidad de contaminante fue diferente en la parte superior y en la parte inferior de los faldones. También diferentes cantidades de contaminante se alojaron sobre el núcleo del aislador. Esto podría indicar que sólo ciertas regiones en el aislador necesitan ser hidrofílicas y contaminadas para que el flameo ocurra.

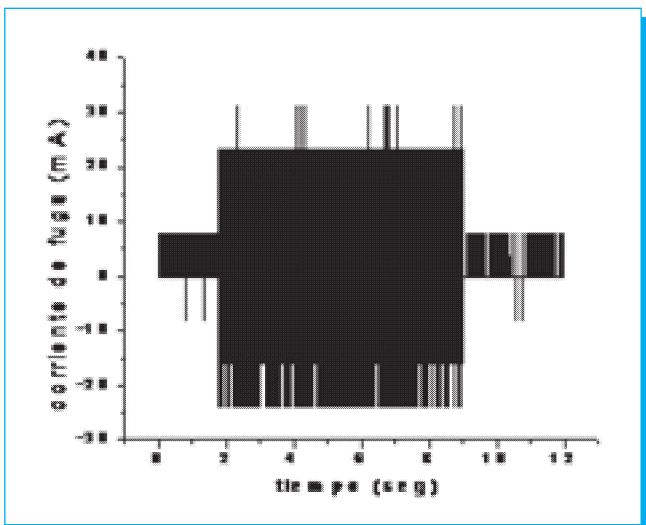


Fig. 14. $V_b = 6.3$ kV, temperatura = 21°C, RH = 53% y DESD = 0.425 mg/cm².

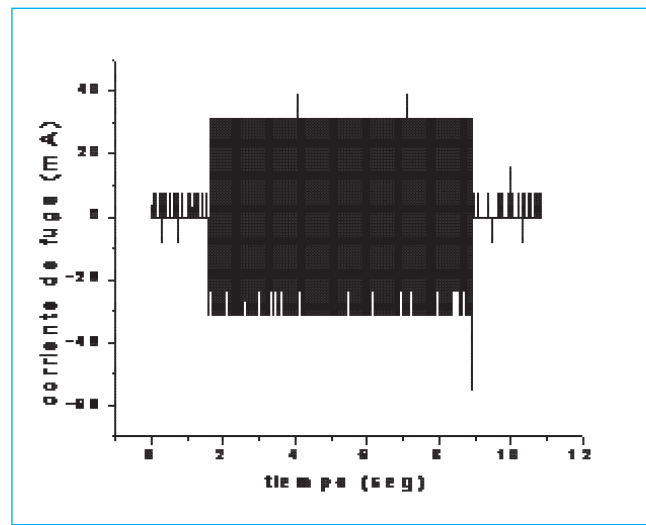


Fig. 16. $V_b = 6.3$ kV, temperatura = 23°C, RH = 75% y DESD = 0.425 mg/cm².

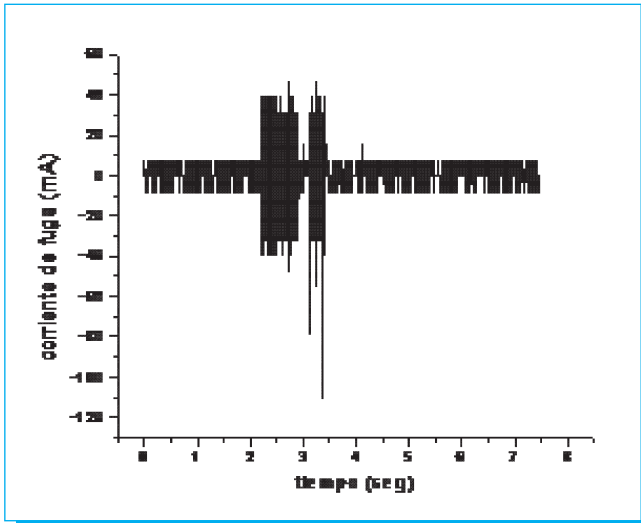


Fig. 17. $V_b = 8.5$ kV, temperatura = 22°C, RH = 87% y DESD = 0.425 mg/cm².

En cada prueba se analizó el espectro de las corrientes de fuga en el dominio de la frecuencia, encontrándose distintas etapas en el desarrollo del arco eléctrico. Los armónicos que aparecieron durante esta etapa de las pruebas fueron básicamente el tercero, el cuarto y el quinto, aunque estos dos últimos de magnitud muy pequeña.

En la figura 18, se observa el comportamiento de la tensión de flameo en función de la humedad relativa para los

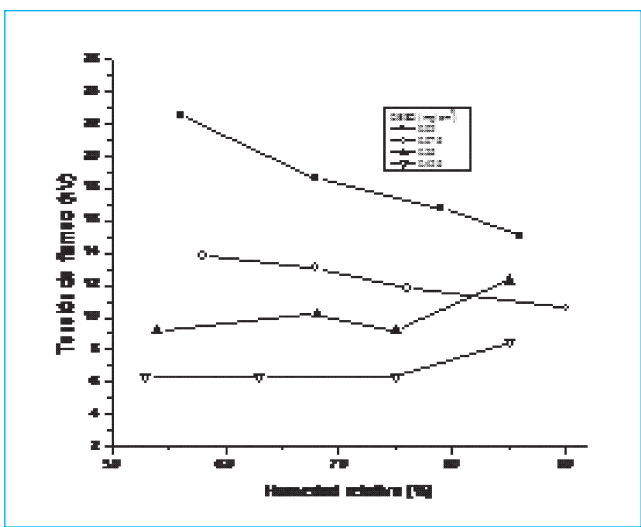


Fig. 18. V_b versus RH.

diferentes niveles de contaminación. Como se aprecia, la tensión de flameo disminuyó significativamente para los niveles de contaminación pesada y muy pesada. Como el espacio entre los faldones del aislador es menor en comparación con los cerámicos, se identificó como un factor que podría influir en que se presentaran arcos entre los faldones al inicio de las pruebas. Esto aunado a que los niveles de contaminación son altos, provoca un flameo en un valor de tensión bajo. Se ha demostrado de las pruebas de contaminación estándar que la variación en la tensión de flameo con la distancia de fuga es lineal [9]. Sin embargo, cuando ocurren descargas entre los faldones en una etapa temprana de las pruebas, esta relación ya no es válida. La teoría de la ruptura superficial por contaminación asume que las descargas se concatenan a lo largo de la superficie del aislador, hasta que se produce un arco entre los electrodos. Los resultados obtenidos en esta etapa de las pruebas refuerzan esta consideración.

Por otra parte, de acuerdo con [7] la tensión disruptiva en la superficie del aislador obedece a la siguiente relación:

$$\frac{V_b}{V_0} = \left\{ \frac{p}{p_0} \right\}^n \quad (1)$$

siendo:

V_b = Tensión de flameo a una densidad de gas p .

V_0 = Tensión de flameo a una densidad de gas p_0 .

n = índice de arqueo que indica el efecto de la presión atmosférica sobre las tensiones de flameo.

Asimismo, la tensión de flameo se puede expresar en buena aproximación como:

$$V = V_0 (1 - 0.035 h) \quad (2)$$

siendo:

V_0 = Tensión de flameo al nivel del mar.

V = Tensión de flameo a una altitud h en km.

h = Altitud en km sobre el nivel del mar.

Usando la ecuación (2) y los valores experimentales de tensión V_0 (a una temperatura constante de 200°C y variaciones pequeñas de humedad relativa), en el cuadro 1 se pueden observar los valores de V_0 para cada uno de los niveles de contaminación considerados.

Los valores de V_0 implican un índice de arqueo $n = 0.3$, lo cual coincide con lo reportado en [7].

5. Conclusiones

El incremento en la humedad relativa, cuando se tienen niveles de contaminación ligeros o medios, provoca que la tensión de flameo tienda a disminuir, alrededor de un 10%. Sin embargo, cuando el nivel de contaminación es alto, el cambio en la humedad prácticamente no provoca cambios en la tensión de flameo. Solamente cuando el intervalo de humedad relativa es muy alto, alrededor del 90%, la tensión de flameo tiende a ser irregular.

El índice de arqueo es igual a 0.3.

6. Referencias

- [1] R. S. Gorur *et al.*, «Contamination Performance of Polymeric insulating Materials used for Outdoor Insulating Applications», *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 24, No. 4, August 1989.
- [2] *Artificial Pollution Tests on High-Voltage Insulators to be used on AC Systems*, IEC-507, 1991-04, Second Edition.
- [3] A. de la O. *et al.*, «AC Clean Fog Tests on non-ceramic Insulating Materials and a Comparison with Porcelain», *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, No. 4, October 1964.
- [4] E. Pérez R., *Impacto de la lluvia ácida sobre el envejecimiento de aisladores EPDM*, Tesis de Maestría, SEPI-ESIME-IPN, México D.F., 2002.
- [5] www.originlab.com
- [6] Minesh Shah, «Raychem Corporation, Menlo Park, CA-94025. USA, Signature Analysis of Flash Over Voltage Phenomena on Contaminated Insulator Surfaces», *IEEE Annual Report-Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, San Francisco, October 23-23, 1996.
- [7] CIGRE WG 33-04 Taskforce 01, *A Review of Current Knowledge: Polluted Insulators*, August 1998.
- [8] M. A. R. M. Fernando and S. M. Gubanski, «Leakage Currents on Non-ceramic Insulators and Materials», *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 6, No. 5, October 1999.
- [9] A. De la O y R. S. Gorur, «Flashover of Contaminated Non-ceramic Outdoor Insulators in a Wet Atmosphere», *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 5, No. 6, December 1998.

Científica:

The Mexican Journal of Electromechanical Engineering

La revista *Científica* ESIME es una publicación trimestral editada por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), que presenta trabajos de investigación o propuestas originales en el área de la Ingeniería Electromecánica y sus ciencias afines.

Los artículos se reciben en la Coordinación Editorial de manera personal con una copia del archivo digital del trabajo y una copia impresa en el Edificio 5, primer piso, en la Oficina de la revista Científica de la Sección de Posgrado de Investigación de la ESIME Zacatenco, UPALM, Col. Lindavista, CP. 07738, México, DF; también se recibe por medio de correo electrónico: revistacientifpn@yahoo.com.mx, revistaesimez@ipn.mx. Para aclaraciones se puede comunicar al teléfono 5729 6000 con las extensión 54518.