

Sistema de Detección y Pronóstico de la Contaminación presente en Aisladores de Alta Tensión de la Subestación Nueva Barranquilla

Julio César Pombo Acevedo & Omar Jose Diaz Aparicio
TRANSELCA S.A E. S. P. Carrera 24 # 1A -24 Piso 18 Edificio BC Empresarial
PBX (095) 3717200 Ext. 52357 & 52237
Email: jpombo@transelca.com.co & odiaz@transelca.com.co
Barranquilla - Colombia

Resumen

Este trabajo tiene por objeto, primero, caracterizar las emisiones acústicas provocadas por los aisladores eléctricos a fin de catalogarla como una medida de la contaminación presente en estos. Segundo, desarrollar un sistema de pronóstico y monitoreo de la corriente de fuga presente en aisladores eléctricos, con el fin de determinar los días adecuados de lavado de éstos.

Introducción

Los aisladores eléctricos utilizados en subestaciones abiertas se encuentran expuestos a agentes contaminantes tales como el polvo, emisiones vehiculares, sales minerales, entre otras, las cuales se acumulan sobre su superficie. Mientras que éste se mantenga seco, el efecto de la suciedad sobre el desempeño del aislador es insignificante [1]. La presencia de humedad en el ambiente crean condiciones que producen una solución conductora sobre la superficie del aislador sucio, provocando una disminución de la propiedad dieléctrica de éste y aumentando la probabilidad de falla debido a la contaminación presente [2], [3].

Debido a que la contaminación es uno de los mayores problemas para la confiabilidad de un sistema de potencia [3]. Se tiene que las emisiones acústicas (EA) o sonidos también constituyen una fuente indicadora de contaminación. Cuando se produce una descarga parcial sobre el aislador contaminado hay una liberación instantánea de energía, algunos de los cuales se emite como energía acústica.

En la actualidad no se han realizado investigaciones en identificar los momentos adecuados de lavado, sin incurrir en sobrecostos por lavados excesivos y sin tener fallas del sistema de potencia. Es por esto que es de suma importancia estudiar el comportamiento en el tiempo de los efectos de la contaminación sobre los aisladores, representados por variaciones en la corriente de fuga que circula en su superficie, a fin de identificar cual es el momento adecuado para realizar el lavado.

Este documento se encuentra estructurado con base en el caso de estudio y el planteamiento del problema. Se analizará la metodología a implementar y los resultados obtenidos en materia de la correlación entre variables atmosféricas y corriente de fuga, el método no invasivo de emisiones acústicas y el sistema integral de pronóstico de la corriente de fuga. Para culminar, se expone la relación del sistema integral de monitoreo de la corriente de fuga y los lavados de la subestación.

1. Caso de estudio: Subestación Nueva Barranquilla

La subestación Nueva Barranquilla se encuentra situada en la ciudad de Barranquilla, capital del departamento del Atlántico en Colombia, a 7 km del mar Caribe y a 6 km del Río Magdalena, como se muestra en la Figura 1. Dada la cercanía de la ciudad con el mar, ésta se encuentra sometida a una atmósfera con alta salinidad, además por ser puerto marítimo experimenta una importante actividad industrial y un intenso tránsito vehicular y naviero; provocando una elevación en la concentración de contaminantes en la atmósfera.



Fig 1. Localización Subestación Nueva Barranquilla

Estudios recientes [4], muestran que la zona donde se encuentra ubicada la subestación tiene un nivel de polución alto según la escala mostrada en la norma IEC 60071-2, con un depósito de sal equivalente de 0.45mg/cm^2 . Adicionalmente se evidencia [5] el efecto que trae la contaminación sobre los aisladores eléctricos y su comportamiento ante los días de no lavado de los equipos y los efectos de la lluvia.

2. Metodología

2.1. Recolección de datos

La medición de corriente de fuga se realizó utilizando la técnica de medición por medio de espiras (collarín) alrededor del

aislador para que circule una corriente en miliamperios. Las mediciones se tomaron durante los meses de marzo y abril del 2014 con un periodo de muestreo de un minuto. La corriente se midió en los aisladores de un transformador de potencial de 220kV. Las mediciones de las variables atmosféricas fueron tomadas mediante una estación meteorológica instalada en la subestación.

2.2. Muestras

Para la medición de la corriente de fuga se utilizaron los aisladores de los circuitos de 220kV en la subestación Nueva Barranquilla. Se utilizaron datos históricos de la magnitud de la corriente de fuga, y de las variables atmosféricas desde diciembre del 2011 hasta diciembre de 2012. El 83% de las muestras fueron tomadas entre las 6:30 am y 8:30 pm.

3. Resultados

3.1. Influencia de las condiciones atmosféricas sobre la corriente de fuga

En este apartado se busca, mediante la medición de la corriente de fuga, determinar la correlación entre dicha corriente con las variables atmosféricas, con el fin de identificar cuales influyen de forma significativa en el aumento de la corriente de fuga.

3.1.1 Descripción de datos clima y de corriente de fuga.

Los valores promedio, mínimo, máximo y desviación estándar de las variables atmosféricas y la corriente de fuga se presentan en la Tabla 1. Se observa que la temperatura, la humedad y la presión poseen una dispersión muy baja, manteniéndose dentro de límites muy cerrados. En contraste, la radiación solar y la dirección del viento se encuentran en límites abiertos, con medidas de dispersión altas.

Tabla I. Descripción de bases de datos utilizada

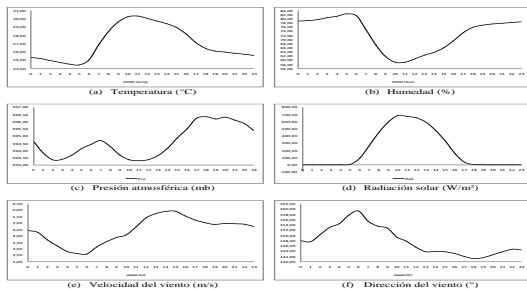
Variable	Mínimo	Máximo	Media	Desv.Est
Temperatura (°C)	22,30	35,70	28,89	2,28
Humedad (%)	41,00	98,00	64,51	8,59
Presión (mb)	980,90	1009,00	992,79	6,03
Radiación solar (W/m ²)	2,00	1199,00	537,85	248,19
Velocidad de viento (m/s)	0,00	27,50	5,18	4,45
Dirección de viento (°)	22,00	360,00	139,18	50,97
Corriente de fuga (mA)	0,24	1,00	0,50	0,13

Fuente: Elaboración propia

Los datos obtenidos particularmente son:

- Variables atmosféricas

Se observa en cada una de las gráficas una clara variación en el tiempo.



Fuente: Elaboración propia

Fig 2. Valores promedio por hora de variables atmosféricas

- Corrientes de Fuga

La media de los datos resultó ser de 0.50mA con una desviación estándar de 0.13mA. El valor mínimo observado fue de 0.236mA y el valor máximo de 1.003mA.

3.1.2 Análisis de correlación

Con el fin de determinar las relaciones existentes entre las diferentes variables atmosféricas y la corriente de fuga, se implementó la matriz de correlación de Spearman. Teniendo en cuenta que un

coeficiente de correlación de Spearman con doble asterisco (**) representa una significancia a nivel de 1% y asterisco simple (*) representa una significancia a nivel de 5%, las correlaciones entre la corriente de fuga y las variables atmosféricas muestran que la primera se encuentra altamente correlacionada con la temperatura ambiente (-0.338**), con la humedad relativa (0.328**), con la radiación solar (-0.159**), con la velocidad del viento (0.343**) y con la dirección del viento (-0.121*). La relación entre la corriente de fuga y la presión atmosférica, según el estudio, es poco significativo, arrojando un coeficiente de -0.020.

3.2. Emisiones acústicas: método no invasivo de detección de contaminación

Las emisiones acústicas se encuentran altamente correlacionadas con la magnitud de la corriente de fuga. Mediante el coeficiente de correlación de Spearman se verificó su relación dando como resultado un coeficiente de 0.794, esto indica que a medida que aumenta dicha corriente, aumenta el nivel de emisiones acústicas provenientes de los aisladores contaminados como se observa en la Figura 3, donde se muestra una tendencia positiva.

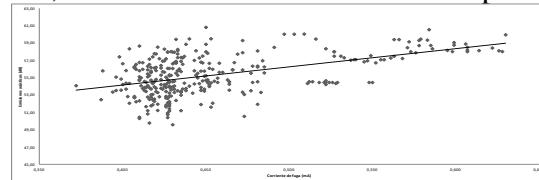


Fig 3. Dispersion Emisiones acústicas vs corriente de fuga.

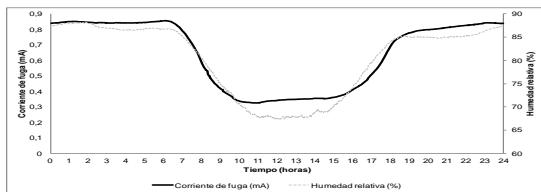
3.3. Sistema integral de monitoreo y pronóstico de la corriente de fuga

3.3.1. Comportamiento en el tiempo de la corriente de fuga

Fluctuaciones diarias

En la figura 4, se muestra el comportamiento promedio de la corriente de fuga en el tiempo. En horas de la mañana-tarde, está cambiando abruptamente su magnitud, reduciéndose en aproximadamente un 60% del valor tenido en horas de la mañana, con un

valor promedio de 0.351mA entre las 9 y las 16 horas. Este comportamiento está determinado por fluctuaciones de la humedad relativa del ambiente durante el día, evidenciando la relación que existe.

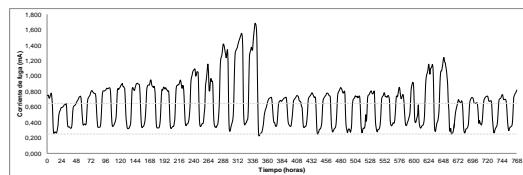


Fuente: Elaboración propia

Fig 4. Comportamiento de la corriente de fuga y su correlación con la humedad relativa

Tendencia de aumento de la corriente de fuga

En la Figura 5, se muestra el comportamiento de la corriente de fuga durante un mes de medición, del 18 de marzo al 18 de abril de 2014.



Fuente: Elaboración propia

Fig 5. Mediciones continuas de corriente de fuga

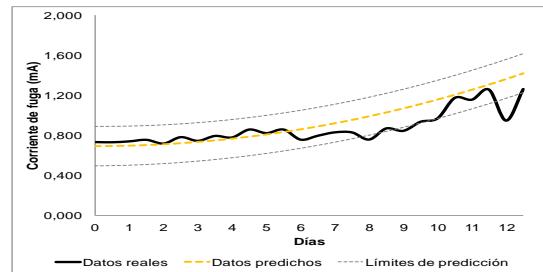
Se observa una disminución del 23% aproximadamente en la magnitud de la corriente de fuga luego de los lavados a los aisladores. Los 14 días siguientes no se efectuó lavado, evidenciándose un aumento en la magnitud de la corriente, debido a la suciedad que se va acumulando en la superficie de los aisladores. A pesar de esto, la corriente de fuga durante las horas de la mañana-tarde (valles de la gráfica) mantiene en una media de aproximada de 0.351mA y una variabilidad muy baja, de 0.080mA, es decir, al estar expuesto a la una humedad relativa, día tras día la magnitud de la corriente de fuga aumenta.

Aproximadamente en la hora 347 (1^{ero} de abril de 2014) se efectúa un nuevo lavado; a diferencia del primer lavado, en este si se

evidencio una reducción del 63%. Comparando los dos lavados y la diferencia en la caída de la magnitud de estos, se tiene que el valor de la cresta de la corriente oscila alrededor del 0.3mA y el valle en 0.65mA. Para el tercer lavado se reduce en un 45% en la magnitud de la corriente de fuga y de la misma manera se obtiene valores cercanos a los ya mencionados para la cresta y el valle de ésta.

3.3.2 Sistema de pronóstico: Modelamiento de la corriente de fuga

El modelo de pronóstico de la corriente de fuga se desarrolló en función de los valores máximos tenidos por día. Se modeló por medio de técnicas de regresión simple dando como resultado la Figura 6. Donde se observan la validación del modelo, el pronóstico realizado y los límites de predicción para la corriente de fuga.



Fuente: Elaboración propia

Fig 6. Medidas segundo periodo de lavado, predicción y límites de predicción.

3.3.3 Sistema de monitoreo: Carta de control

Las cartas de control son técnicas donde se mantiene con la mínima variabilidad del proceso, en este caso es la corriente de fuga. La carta de control del promedio móvil ponderado exponencialmente (EWMA), es una buena alternativa para detectar corrimientos pequeños en la media del proceso(Montgomery, 2004). Típicamente los parámetros de diseño de EWMA son el múltiplo de sigma en los límites de control (L) y el valor de λ .

Adaptándolo a este caso, los parámetros de diseño que se usarán para la carta serán el valor de λ y el valor de la corriente máxima permisible (I_{max}). Para

determinar los parámetros se definirán dos conceptos claves, el primero, las FALSAS ALARMAS (abreviado FA) y el segundo, las OMISIONES DE LAVADO (abreviado OL). Las Falsas Alarmas se definen como el número de veces por unidad de tiempo que se realizó la actividad de lavado de aisladores siendo que no era necesario porque la magnitud de la corriente de fuga no había sobrepasado el límite máximo permisible. Las Omisiones de Lavado se definen como el número de veces por unidad de tiempo que NO se lavaron los aisladores de la subestación siendo que era necesario porque la magnitud de la corriente de fuga había sobrepasado el límite máximo permisible.

Los resultados finales de la optimización muestran que el valor óptimo de Imax es de 1.292mA, entre tanto λ no resultó significativa para el modelamiento, por lo tanto, el valor utilizado para la carta fue de 0.6.

4. Sistema integral de pronóstico y monitoreo de la corriente de fuga y la planeación de los lavados de la subestación

Teniendo en cuenta el modelo de regresión de la corriente de fuga y el diseño de carta de control EWMA desarrollado, se realizó una evaluación de la predicción de los días de lavado de los aisladores de la Subestación Nueva Barranquilla.

4.1.1. Método actual de planeación de lavados

Actualmente el método para la planeación de los lavados de los aisladores de la subestación se realiza mediante un ciclo

anual repetitivo.

Tabla II. Plan de lavado Enero a Mayo de 2014

FECHA (ENERO/2014)											
M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
11											
FECHA (FEBRERO/2014)											
S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4											
FECHA (MARZO/2014)											
S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7											
FECHA (ABRIL/2014)											
M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10											
FECHA (MAYO/2014)											
J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
13											

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla II, se muestra una sección del plan de lavado del año 2014. Las casillas marcadas de color verde indican los días en los que se lavaran los aisladores de la subestación. Las casillas marcadas en rojo son días festivos en los cuales no se labora en la subestación. Se observa que los lavados no se encuentran distribuidos de forma equidistante, mostrando periodos de lavado entre los 5 y 12 días, siendo el periodo de 5 días el más frecuente (50%) y siguiendo con el de 12 días (41.6%).

- Falsas alarmas y omisiones de lavado como indicadores de calidad de la planeación del lavado

Para este análisis se realizó conteo de la cantidad de lavados que se efectuaron adecuadamente el día en el que la corriente de fuga había sobrepasado el límite máximo permisible. Con base a estos tres conteos se establecieron los siguientes indicadores:

$$K_{FA} = \frac{FA}{FA + OL + L_{ad}} \quad (1)$$

$$K_{OL} = \frac{OL}{FA + OL + L_{ad}} \quad (2)$$

$$K_{Lad} = 1 - K_{FA} - K_{OL} \quad (3)$$

KFA es denominado razón de lavado anticipado y representa el porcentaje de los lavados realizados antes de que la corriente de fuga sobrepasara el límite. KOL es denominado razón de lavado posterior y representa el porcentaje de los lavados NO realizados dado que la corriente de fuga ya había sobrepasado el límite. KLad es el porcentaje de lavados realizados a tiempo.

Tabla III. Valores de KFA, KOL y KLad años 2008 a 2012.

Año	KFA (%)	KOL (%)	KLad (%)
2008	36	40	26
2009	26	60	14
2010	68	22	10
2011	66	18	11
2012	93	7	0

Fuente: Elaboración propia

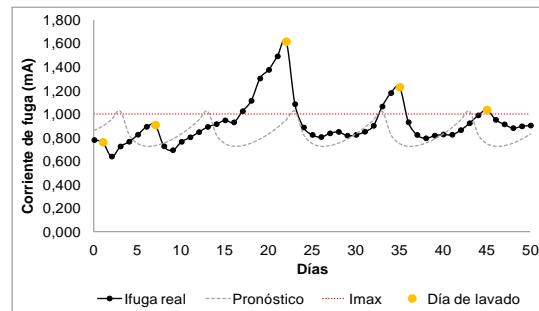
Se observa que la totalidad de los lavados fueron realizados sin cumplir con la corriente límite. El 93% de los lavados fueron realizados anticipadamente y el 7% de los lavados no fueron realizados. Este cambio en las políticas de lavado muestra un comportamiento paulatinamente más conservador año tras año, dado que se decide lavar los aisladores antes de que la corriente de fuga llegue al límite para evitar posibles fallas de los circuitos de la subestación. Esto se evidencia con una tendencia de aumento de K_{FA} del 15% anual y una tendencia de descenso K_{OL} de 11% anual.

4.1.2. Implementación de sistema de pronóstico y monitoreo

Con base a mediciones tomadas entre marzo y abril del 2014 se establece la comparación entre la planeación del lavado con base a la metodología vigente en la subestación del caso del estudio y la planeación con base al sistema integral de pronóstico y monitoreo.

- Pronóstico con I_{max} = 1mA

Contemplando una corriente de fuga límite 1mA, límite usado por los operarios de la subestación para tomar la decisión de lavar, se procede a realizar pronósticos de los días de lavado de la subestación.



Fuente: Elaboración propia
Fig 7. Pronóstico de lavado de aisladores.

Se observa en la Figura 7 que el primer lavado no causó un cambio significativo en la media de la corriente, donde no supera la corriente límite, ni se encuentra en una pendiente creciente. En conclusión, este lavado no era necesario realizarlo. El segundo lavado se encontraba en un aumento sostenido de la media de la corriente de fuga, pero no igualó o sobrepasó el valor límite. Los lavados subsecuentes eran necesarios y cumplían con la condición de lavado. Particularmente el tercer lavado no se realizó cuando se debía aumentando la media de la corriente de fuga a un valor aproximado de 1.6mA.

Tabla IV. Días pronosticados de lavado.

Día	Fecha
3	13 de marzo de 2014
13	23 de marzo de 2014
23	2 de abril de 2014
33	12 de abril de 2014
43	22 de abril de 2014

Fuente: Elaboración propia

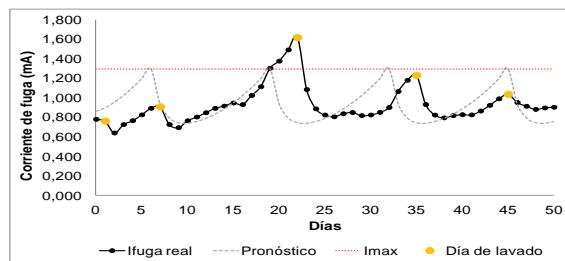
Comparando el método actual de planeación de los lavados con el método propuesto, utilizando a I_{MAPE} (*Mean Absolute Percentage Error*) como indicador de desempeño, definido como:

$$I_{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|I_{lavado} - I_{max}|}{I_{max}} \quad (4)$$

Se concluye que el modelado del aumento de la corriente de fuga y en la implementación de cartas de control de promedio móvil ponderado presenta un mejor desempeño presentando un I_{MAPE} de 2.2% contra los 24.3% del método de planeación actual.

- Pronóstico con $I_{max} = 1.292 \text{ mA}$

Teniendo en cuenta que en el desarrollo de la carta de control se determinó que una $I_{max} = 1.292 \text{ mA}$ minimiza la cantidad de falsas alarmas y omisiones de lavado, en la Figura 8 se muestra el pronóstico de lavado con base a esta corriente máxima permisible. La cantidad de días de lavado pronosticados se reduce de 5 a 4 en los dos meses de análisis.



Fuente: Elaboración propia

Fig 8. Pronóstico de lavado de aisladores.
 $I_{max}=1.292 \text{ mA}$

Teniendo en cuenta que el primer día de análisis de pronóstico es el 10 de marzo de 2014, los días que el sistema de pronóstico y monitoreo determinó como días de lavado los mostrados en la Tabla V.

Tabla V. Días pronosticados de lavado.

Día	Fecha
6	16 de marzo de 2014
19	29 de marzo de 2014
32	11 de abril de 2014
45	24 de abril de 2014

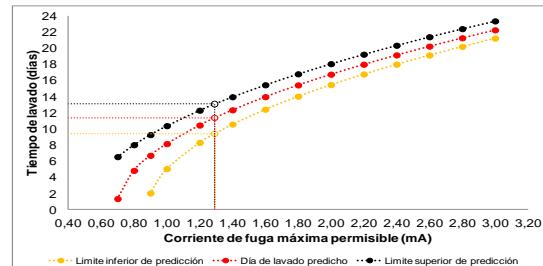
Fuente: Elaboración propia

La comparación arroja resultados similares a los obtenidos con el pronóstico con $I_{max} = 1 \text{ mA}$. El error I_{MAPE} para el método actual da un valor de 24.1%, mientras que I_{MAPE} para el método propuesto arroja un valor de 0.4%.

- Generalización resultados de pronósticos

Mediante los cálculos de límites de predicción del modelo ilustrado en la

Figura 6, se modelaron los límites de generalización de resultados de los pronósticos. En la figura 9, se muestran los días en los cuales se debe realizar el lavado en función de la corriente máxima permisible, I_{max} .



Fuente: Elaboración propia

Fig 9. Intervalo de tiempo para lavado de aisladores en función de I_{max}

Se observa, que para una corriente límite de 1mA el lavado de los aisladores se debe realizar entre el quinto y el décimo día después del último lavado, teniendo un rango de predicción de 6 días. Mientras tanto para una corriente límite de 1.292mA se debe realizar el lavado entre el noveno y treceavo día después del último lavado, teniendo un rango de predicción más preciso de 5 días. Para valores de corriente límite mayores o iguales a 2.2mA, la predicción se vuelve más precisa, tiendo un rango de predicción de 3 días.

5. Reducción de costos con el modelo de pronósticos

De acuerdo a los resultados que arrojó el Sistema de Pronósticos se ha generado hasta el mes de Mayo de 2014 una disminución de los costos asociados a la actividad (servicio de lavado y adquisición del agua desmineralizada) del 28.6% equivalente a \$ 23.000.000 (pesos Colombianos).

En la figura 10 se observa la comparación de los costos del lavado por el método de programación anual por periodicidad y mediante el Sistema de Pronósticos.



Fuente: Elaboración propia

Fig 10. Comparación costos de lavado con y sin pronóstico.

6. Conclusiones y recomendaciones

Se estudió la correlación existente entre las variables atmosféricas y la corriente de fuga. Se obtuvo que ésta se encuentra directamente relacionada con la humedad y la velocidad del viento. En contraste, dicha corriente se encuentra inversamente relacionada con la temperatura ambiente, la radiación solar y la dirección del viento. La presión atmosférica no tuvo una correlación significativa con la corriente de fuga.

El pronóstico y monitoreo de la corriente de fuga se basó en el modelamiento de la tendencia de crecimiento de ésta por medio de un modelo de regresión. Por otro lado, el monitoreo se desarrolló mediante el diseño de una carta de control de promedio móvil (EWMA). Este método de pronóstico y monitoreo es el inicio de una serie de investigaciones. Una de éstas estará enfocada al diseño del sistema de monitoreo en tiempo real, en donde, por medio de mediciones continuas de corriente de fuga y variables climáticas como la humedad se pueda realizar reajustes a los pronósticos dados por el sistema diseñado en este estudio.

7. Referencias bibliográficas.

- [1] G. Aisladores, “Guía para la limpieza de aisladores según Norma IEEE STD 957-1995 PARTE 2,” no. 67, 1995.
- [2] J. Zhou, B. Gao, Q. Wang, and Q. Zhang, “Leakage Current Pattern for Diagnosing the Contaminated Degree of Ceramic Insulators under Different Humidity,” *2009 Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf.*, pp. 1–4, Mar. 2009.
- [3] J. Li, W. Sima, C. Sun, and S. Sebo, “Use of leakage currents of insulators to determine the stage characteristics of the flashover process and contamination level prediction,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 17, no. 2, pp. 490–501, Apr. 2010.
- [4] G. Aponte, J. C. Castro, V. H. Sanchez, M. Castro, A. Espinosa, and N. Rosales, “Contamination level evaluation on Colombian north cost,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 7, 2009.
- [5] R. Diaz, J. E. Candeló, and J. Betancur, “Software tool to detect hot spots on electrical insulators,” in *2013 12th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 2013, pp. 7–12.

Julio César Pombo Acevedo

Ingeniero Electricista, Especialista en Sistemas de Transmisión de Energía Eléctrica, en Finanzas y Magíster en Administración de Empresas (MBA) Universidad del Norte, Barranquilla – Colombia.
Cargo actual: Coordinador Sénior de Mantenimiento. Departamento de Gestión del Mantenimiento. TRANSELCA S.A. E.S.P.

Omar Díaz Aparicio

Ingeniero Electromecánico y Especialista en Sistemas de Transmisión de Energía Eléctrica. Universidad Antonio Nariño – Universidad del Norte, Barranquilla – Colombia.
Cargo actual: Analista Senior de Mantenimiento. Departamento de Gestión del Mantenimiento. TRANSELCA S.A. E.S.P.