

Electric Field Distribution and Leakage Currents in Glass Insulator Under Different Altitudes and Pollutions Conditions using FEM Simulations

J. Araya, J. Montaña and R. Schurch

Abstract— The influence of pollution and atmospheric altitude on the dielectric performance of a glass insulator was studied by means of finite element analysis simulations. Contamination levels were represented by thin layers with different values of conductivities and thicknesses. Altitudes differences were simulated by equivalent voltages using correction factors. The results showed that by increasing the conductivity and altitude values, there was a considerable increase in the concentration of the electric field and leakage currents, changing from capacitive to resistive regime of electrical potential distribution along the insulator surface. The proposed levels of contamination and altitudes were analyzed by increasing the dimensions of the insulator according to IEC standards. In the case of the capacitive regime (conductivities lower than 10^{-4} S/m) there was a decrease in the electric field intensity up to 21% compared to an insulator at sea level. In resistive regime, a decrease up to 34.5% was obtained for leakage currents considering conductivities calculated according to the site pollution severity shown in the IEC standard. Despite the decrease of the leakage current after the increase of the insulator dimensions based on the standards, it did not mitigate all theoretical leakage current calculated along the insulator surface. Future work will focus on experimental research to validate this theoretical results.

Index Terms— Altitude, COMSOL, Electric Field, FEM, Glass insulator, Leakage current, Pollution, Potential distribution.

I. INTRODUCCIÓN

Los aisladores utilizados a la intemperie están en constante interacción con las condiciones atmosféricas del medio y los diferentes tipos y grados de contaminación, por lo que es importante evaluar el desempeño que estos tienen ante diferentes condiciones de operación. Para cumplir los requerimientos de la coordinación de aislamiento, las distancias de paso y de fuga deben ser corregidas a medida que se aumenta la altitud de operación [1], adicionalmente, se sugiere aumentar las distancias de fuga a medida que se aumenta el nivel de contaminación del sitio [2]. Respecto a la contaminación utilizada, se han usado las normas IEC 60815-1 e IEC 60507 [3, 4] para definir el tipo de contaminación. Se define la contaminación tipo A a aquella que es compuesta por elementos solubles e insolubles, y tipo B a la que se compone en su mayoría por elementos solubles con una mínima porción de

elementos insolubles [3]. Los tipos de contaminación son determinados por las características geográficas y de contaminación del medio donde se instalarán los equipos de aislamiento.

Al realizar una revisión de algunas investigaciones hasta la fecha, se han encontrado gran cantidad de estudios enfocados a conocer las distribuciones de potencial y campo eléctrico en la frontera de distintos tipos de aisladores. Por ejemplo, en los estudios [5, 6, 7], se obtuvieron y analizaron distribuciones de potencial y de campo eléctrico sobre la superficie de aisladores de porcelana, poliméricos y vidrio respectivamente. En estos estudios, han optado por dibujar una capa distribuida uniformemente para distintos valores de conductividades y espesores, para luego identificar las regiones con mayor concentración de campo eléctrico, mostrando una dependencia del aumento de la concentración de campo eléctrico con el incremento de la conductividad de la capa.

Para los casos de análisis de corrientes de fuga, se pueden comparar dos modelos de obtención de las corrientes que circulan en una superficie conductiva para un aislador polimérico [8]. Un modelo se basa en la teoría de circuitos y el otro en la teoría de campos, con ambos modelos se obtienen valores de corrientes de fuga similares. Este aumento de corrientes es perjudicial para la superficie de los aisladores, ya que provoca un aumento de temperatura sobre la superficie, dañando con el tiempo al material aislante [9]. Además, el aumento de temperatura en la superficie de un aislador contaminado genera bandas secas, las cuales producen concentraciones de campo eléctrico adicionales, favoreciendo la ocurrencia del flameo [10].

La contaminación sobre un aislador puede ser modelada de dos maneras, dibujándola o representándola como condición de borde en la simulación. En [11], por ejemplo, se comparó el error y el número de elementos de cada malla de cada método, obteniéndose errores menores al 3% entre éstas y una disminución del 25% de elementos al usar la condición de borde.

Respecto a la altitud, se puede decir que cada 1000 metros de altura, la tensión de flameo en el aire disminuye aproximadamente en un 6% para una contaminación de nivel leve [12, 13], este efecto es provocado por la disminución de presión atmosférica. Estudios realizados por expertos del área, han logrado consensuar algunos rangos para utilizar los factores de corrección para altitudes con niveles de contaminación mayores, tanto para tensiones continuas como alternas [14].

Las simulaciones fueron realizadas usando el método de elementos finitos, ecuaciones diferenciales de la teoría de campos para obtener la ecuación del modelo discretizado y

J. Araya was with Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile (e-mail: jersim.araya.salinas@gmail.com).

J. Montaña is with Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile (e-mail: johny.montana@usm.cl).

R. Schurch is with Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile (e-mail: roger.schurch@usm.cl).

Corresponding author: Jersim Daniel Araya Salinas

tensiones de los terminales como condiciones de frontera de Dirichlet [5, 7, 15].

Teniendo en cuenta todos estos antecedentes, para esta investigación se ha decidido representar la contaminación como condición de borde del modelo. Se han realizado simulaciones para conocer las distribuciones de campo eléctrico en la frontera de un aislador estándar de vidrio clase U120B, ante distintas condiciones de contaminación y altitud. Los resultados obtenidos se han comparado con los del aislador corregido a las distancias de fuga y de paso incrementadas para soportar la contaminación y la altitud deseada, según las normas IEC 60071-2 e IEC 60815-2 [1, 2]. Al evaluar las corrientes de fuga y niveles de campo eléctrico ante las condiciones de estudio, se podrá comprobar si con el aumento de las dimensiones del aislador se logran disminuir los efectos provocados por la contaminación y la altitud en el desempeño del aislador.

II. METODOLOGÍA Y MODELO DE SIMULACIÓN

A. Aislador Bajo Estudio

Para realizar este estudio se diseñó un perfil de aislador estándar de vidrio clase U120B [16], este perfil contiene las características mostradas en la Tabla I y la geometría mostrada en la Fig. 1. Los parámetros eléctricos de interés se muestran en la Tabla II.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES DEL AISLADOR
ESTANDAR DE VIDRIO U120B DISEÑADO

Distancia de paso	146 [mm]
Diámetro	255 [mm]
Distancia de fuga	305 [mm]
Tensión de servicio	15 [kV]
Tensión de impulso	100 [kV]

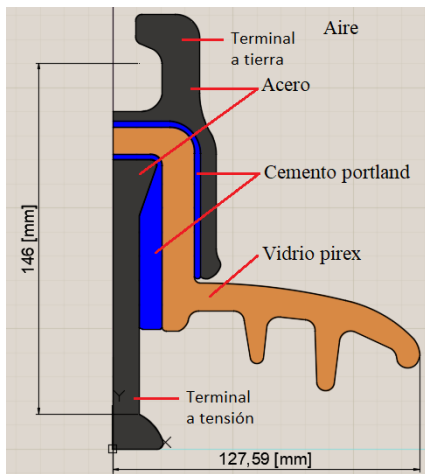


Fig. 1. Modelo de eje simétrico del aislador estándar U120B.

TABLA II
PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LOS MATERIALES

Material	Permitividad relativa [-]	Conductividad [S/m]	Referencia
Aire	1	10^{-12}	[17]
Acero	1	$1,03 * 10^7$	[18]
Cemento portland tipo III	7	10^{-8}	[19]
Vidrio pirex	8	10^{-14}	[20]

B. Condiciones Ambientales

Una de las condiciones que se trataron en este trabajo fue la contaminación, representándose sólo de manera teórica, como una capa delgada distribuida uniformemente a través del camino de fuga de un aislador de disco, basado en valores reales de contaminación con caolín obtenidos en laboratorio. Por otro lado, otra de las condiciones que se ha considerado es el efecto de la altitud, la que mediante tensiones equivalentes representará las altitudes de 1000, 3000 y 5000 msnm (metros sobre el nivel del mar), estas tensiones equivalentes se obtuvieron al multiplicar la tensión de servicio del aislador por el factor de corrección de altitud [1]. Este factor es basado en la variación de la presión atmosférica en función de la altitud, como se verá más adelante.

Los efectos de la temperatura y la humedad, no se han considerado en este estudio, ya que según la norma IEC 60071-2 [1] estos efectos tienden a cancelarse entre sí a medida que aumenta la altitud.

C. Tipo de Contaminación

Para las simulaciones, se utilizó la contaminación tipo A determinada y descrita en la norma IEC 60815-1 [3], ésta se caracteriza por contener elementos solubles y elementos insolubles. Los elementos solubles se identifican mediante el cálculo de la densidad de sal equivalente depositada, o ESDD, por su sigla en inglés (“Equivalent Salt Deposit Density”) representada en (1). Para obtener esta densidad se requiere calcular el valor de la salinidad S_a representada por (2). En este estudio se han utilizado conductividades de capa σ_V dentro del rango de 0,004 S/m a 0,4 S/m.

$$ESDD = (S_a * V)/A \quad (1)$$

$$S_a = (5,7 * \sigma_V)^{1,03} \quad (2)$$

En relación con los elementos insolubles, estos se caracterizan por la medición de la densidad de insolubles depositados, o en su sigla en inglés “Non Soluble Deposit Density” (NSDD), como se representa en (3). Para lograr este resultado, se requiere conocer la masa del material insoluble, la cual está definida en el Apéndice C de la norma IEC 60815-1 [3].

$$NSDD = 1000 * \frac{m_{No\ soluble}}{A} \quad (3)$$

D. Espesores de la Capa de Contaminación

Para determinar los espesores de la contaminación, la capa distribuida uniformemente se ha representado como un disco de área A igual a la superficie total del aislador y con altura del disco igual al espesor d_s , tal como se presenta en la Fig. 2. Esta geometría fue obtenida de [21], donde se utilizó un disco para medir los espesores de distintas cenizas volcánicas. Con esto se relacionará el NSDD con los distintos espesores de la capa a medida que aumenta la cantidad de material insoluble.



Fig. 2. Representación de capa uniformemente distribuida como disco.

Como el área A del aislador no varía, el aumento del volumen V del disco está relacionado directamente con el aumento de la altura h , como se representa en (4), y por lo tanto el aumento del espesor está relacionado con el aumento de la cantidad de material.

$$h = \frac{V}{A} \quad (4)$$

Los materiales insolubles o inertes sugeridos a utilizar son el Kieselguhr, Caolín o Tonoko [4]. Se ha decidido usar el caolín por su fácil obtención dentro del mercado. La Tabla III muestra los parámetros eléctricos de este material. En el laboratorio se procedió a medir la masa y volúmenes de diferentes cantidades de caolín. Finalmente, se obtiene la relación masa-volumen que se muestra en la Fig. 3.

TABLA III
PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL MATERIAL INSOLUBLE

Material	Permitividad relativa	Conductividad [S/m]	Referencia
Caolín	8	0,001	[22]

Tal como se observa en la Fig. 3, la relación obtenida es lineal, por lo que se ha utilizado la ecuación de la recta de la tendencia lineal, obtenida con el método de mínimos cuadrados. Al reemplazar (3) en la ecuación obtenida de la tendencia, se obtiene (5), ésta se utilizó para calcular los espesores de la capa de contaminación d_s para cualquier valor de NSDD.

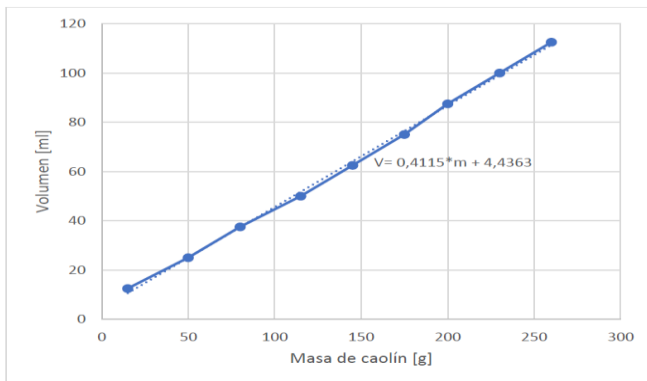


Fig. 3. Relación entre la masa y el volumen del material insoluble.

$$d_s = \frac{0,4115 * \left(NSDD * \frac{A}{1000} \right) + 4,4363}{A} \quad (5)$$

E. Nivel de Severidad de Contaminación del Sitio

La severidad de contaminación del sitio, o en su sigla en inglés Site Pollution Severity (SPS), determina la relación entre los valores de ESDD y NSDD para la contaminación tipo A y la posiciona dentro de alguno de los cinco niveles de severidad [3]. Cada nivel de severidad determina además la distancia de fuga unificada específica, o en su sigla en inglés Unified Specific Creepage Distance (USCD), como se puede ver en la Tabla IV; un ejemplo de la utilización de estos valores es presentado en [23]. Al multiplicar estos valores por la tensión y el factor de corrección por altitud mediante (6), se obtiene la distancia de fuga mínima del aislador (Creepage Distance, CD), necesaria para soportar el nivel de contaminación obtenido [2].

$$CD = USCD * k_a * V \quad (6)$$

TABLA IV
VALOR DE USCD SEGÚN NIVEL DE SPS [2]

Nivel de SPS	USCD [mm/kV]
Muy leve (VL)	22
Leve (L)	27,5
Medio (M)	34,7
Fuerte (H)	43,3
Muy fuerte (VH)	53,7

Para el caso de este estudio se eligieron los puntos representados en la Fig. 4, para cada uno de ellos se obtuvo el valor de conductividad y el espesor de la capa de contaminación; los valores obtenidos se muestran en la Tabla V.

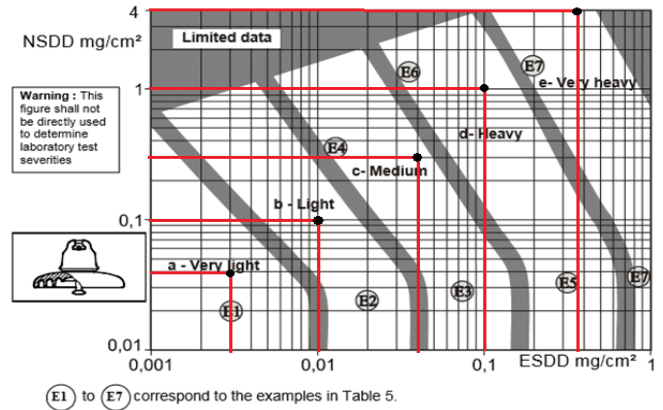


Fig. 4. Puntos elegidos de ESDD/NSDD para los niveles de SPS. Tomado de [3].

TABLA V
OBTENCIÓN DE CONDUCTIVIDAD Y ESPESOR DE LA CAPA DE CONTAMINACIÓN SEGÚN NIVEL DE SPS

Nivel SPS	ESDD [mg/cm^2]	NSDD [mg/cm^2]	σ_v [S/m]	Espesor d_s [mm]
Muy leve (VL)	0,003	0,04	0,004	0,0226
Leve (L)	0,01	0,1	0,0128	0,023
Medio (M)	0,04	0,3	0,0490	0,024
Fuerte (H)	0,1	1	0,1193	0,027
Muy fuerte (VH)	0,35	4	0,4	0,04

F. Efecto de la Altitud

Para representar el efecto de la altitud (H), se ha utilizado el factor de corrección por altitud de acuerdo con [1], por medio de (7), la cual relaciona la variación de la presión atmosférica con la altitud. Los factores calculados fueron para las alturas de 1000, 3000 y 5000 msnm (ver Tabla VI). Éste último valor fue elegido debido a que existen mineras por encima de los 4000 msnm. Estos factores fueron aplicados a la tensión de servicio del aislador, para obtener el valor equivalente a nivel del mar, un ejercicio inverso al llamado derrateo (por ejemplo, si la tensión de servicio es 15kV a 3000 msnm, ésta equivale a 18,032 kV a nivel del mar). Se ha utilizado un valor del exponente m igual a 0,5 en (7), este valor es el sugerido por los estudios realizados en [14, 24] para el caso de tensiones alternas.

$$k_a = e^{m * \frac{H}{8150}} \quad (7)$$

TABLA VI
TENSIONES EQUIVALENTES PARA LA ALTITUD REQUERIDA

Altitud [metros]	k_a	Tensiones equivalentes [kV]
0	1	15,000
1000	1,0633	15,950
3000	1,2021	18,032
5000	1,3590	20,385

G. Modelo de Simulación

Para realizar las simulaciones del modelo, se ha ocupado el software comercial COMSOL *Multiphysics*. Este software permite realizar simulaciones ocupando el método de elementos finitos, y mediante la elección de módulos se pueden simular los efectos de los distintos fenómenos físicos asociados. En esta investigación, se ocupó el módulo de corrientes eléctricas de corteza (módulo 'ecs') para simular la capa de contaminación. Las relaciones entre cantidades físicas y vectores del módulo de corrientes eléctricas de corteza, están gobernadas por (8) [11]:

$$d_s(\sigma_V + j\omega\epsilon_r\epsilon_0)\nabla V^2 + j\omega\rho_S = 0 \quad (8)$$

Siendo d_s el espesor, σ_V la conductividad de la capa, ω la frecuencia angular, ϵ_r la permitividad relativa de la capa y ρ_S la densidad superficial de carga.

Para determinar si el modelo de investigación puede ser estudiado mediante un análisis electrostático, cuasi-estático o un análisis de conducción de corrientes, se examinó la influencia de la permitividad de la capa en (8), bajo el criterio revisado en [15], es decir, cuando $\sigma_V \ll \omega\epsilon_r\epsilon_0$ puede ser omitida la conducción de corrientes, ya que el modelo se encontraría dentro en un régimen capacitivo, pudiendo ser estudiado mediante un análisis del tipo electrostático. Por otro lado, al ser $\sigma_V \gg \omega\epsilon_r\epsilon_0$ la capa se comporta como un conductor, encontrándose en un régimen resistivo, en este caso el modelo es representado mediante un modelo de corrientes eléctricas. Así, bajo estos criterios se han utilizado los módulos electrostático (módulo 'es') y corrientes eléctricas (módulo 'ecs') del software de simulación.

El criterio utilizado en este estudio para identificar el límite numérico de cambio de régimen fue, para valores de $\sigma_V/\omega\epsilon_r\epsilon_0 < 10^{-2}$ régimen capacitivo, mientras que para valores de $\sigma_V/\omega\epsilon_r\epsilon_0 > 10^3$ régimen resistivo. Los valores entre 10^{-2} y 10^3 , pueden ser analizados bajo una aproximación cuasi-estática. Una vez conocidos los límites numéricos del cambio de régimen, se evaluó la influencia de la permitividad de la capa para los valores de conductividad obtenidos según el ESDD utilizados en este estudio.

Según los resultados de la Tabla VII, los valores de las conductividades a utilizar en este estudio son sumamente mayores a la influencia de la permitividad, encontrándose todos los valores en régimen resistivo. Por tal motivo, se decidió estudiar el modelo de capa en dos ámbitos; el primero, analizando un modelo capacitivo para conductividades entre 10^{-6} y 10^{-4} S/m, de tal forma que se pueda observar la influencia de la permitividad. El segundo, analizando el régimen resistivo con las conductividades obtenidas a partir del ESDD de la Tabla V, estudiando las corrientes de fuga. El objetivo es comparar el comportamiento en la frontera del aislador.

TABLA VII
ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA PERMITIVIDAD PARA LAS CONDUCTIVIDADES OBTENIDAS SEGÚN NIVEL DE SPS

σ_V [S/m]	0,004	0,0128	0,049	0,1193	0,4
$\sigma_V/\omega\epsilon_r\epsilon_0$	1,76e5	5,75e5	2,2e6	5,36e6	1,79e7

Por medio del software COMSOL *Multiphysics*, se ha elegido un ambiente de simulación simétrico al eje, por tal motivo, se ha ingresado un diseño propio de un aislador U120B para ser estudiado bajo el método de elementos finitos (MEF), y así analizar las distribuciones de potencial y de campo eléctrico, como también las corrientes de fuga de la capa conductiva. Los parámetros de simulación del modelo del aislador clase U120B se muestra en la Fig. 5.

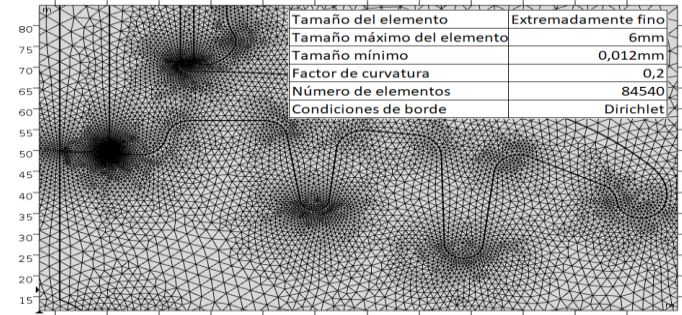


Fig. 5. Malla de elementos finitos del modelo discretizado.

III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. Régimen Capacitivo

Para conocer la influencia de la contaminación en el modelo, se utilizaron las conductividades entre 10^{-6} y 10^{-4} S/m, para un espesor fijo de la capa con un valor $d_s = 0,02$ mm. Como se observa en la Fig. 6, estas conductividades presentan una característica típica de un régimen capacitivo, es decir, con el aislador limpio, similar a los resultados obtenidos en [7]. Se aprecia que el aumento de conductividad provoca un incremento del potencial a lo largo del camino de fuga comprendido entre 25 mm y 250 mm, notándose una tendencia a perder el régimen capacitivo.

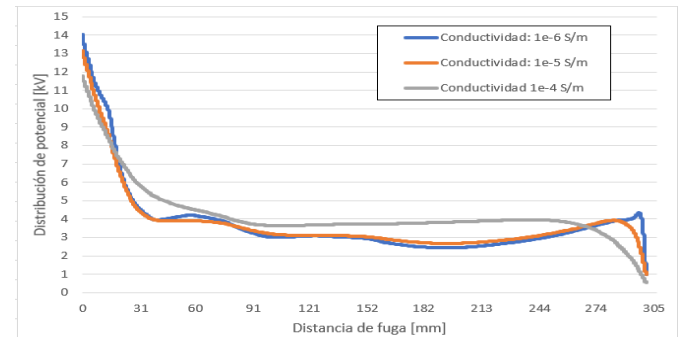


Fig. 6. Régimen capacitivo: distribución de potencial a distintas conductividades sobre la superficie del aislador.

Al igual que en los estudios [7, 10], en la Fig. 7 se observa que el campo eléctrico normal máximo se concentra en la cercanía de los terminales metálicos, con una mayor intensidad en el terminal de tierra. Las diferencias de los resultados con [7] se deben a los distintos diseños utilizados, tanto para el aislador como para la representación de la capa de contaminación utilizada en el estudio. Al aumentar la conductividad se aprecia

una mayor intensidad de campo eléctrico sobre la superficie del aislador, tal como se obtiene en [10], además se puede observar una tendencia a disminuir la intensidad del campo eléctrico en las zonas cercanas a los terminales.

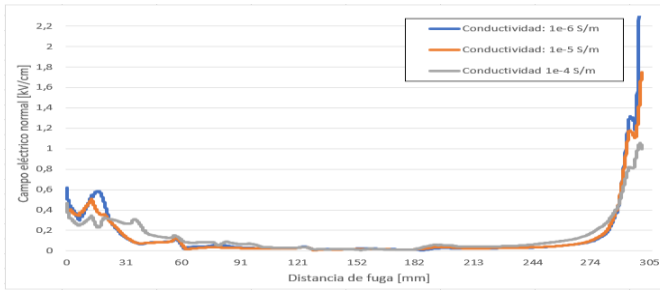


Fig. 7. Distribución del campo eléctrico normal a distintas conductividades sobre la superficie del aislador.

En las Fig. 8 y Fig. 9 se presentan los contrastes en las distribuciones espaciales de potencial y de campo eléctrico para dos casos de conductividad, se puede ver un aumento espacial en la distribución de potencial sobre los pliegues de la superficie inferior del aislador para la conductividad mayor, esto modifica la intensidad de campo eléctrico tanto en el interior del aislador como en el aire, estos resultados concuerdan con los obtenidos en [6].

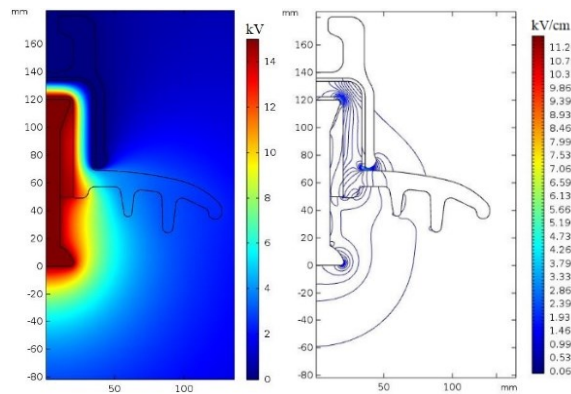


Fig. 8. Caso $\sigma_v = 1e-6$ S/m. Distribución de potencial eléctrico (izquierda). Distribución de campo eléctrico normal (derecha).

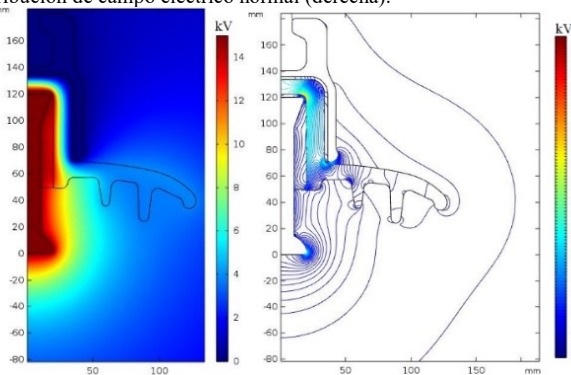


Fig. 9. Caso $\sigma_v = 1e-4$ S/m. Distribución de potencial eléctrico (izquierda). Distribución de campo eléctrico normal (derecha).

B. Régimen Capacitivo con Influencia de la Altitud

Como se definió en la Tabla VI, se utilizaron las tensiones de servicios calculadas para las altitudes de 1000, 3000 y 5000 msnm, para simular el efecto del aumento de la altitud. Al aumentar la tensión aplicada en la simulación, se fuerza que los valores sean mayores, sin embargo, se compararán los

resultados obtenidos por el perfil U120B con un perfil U400B, que cuenta con una mayor distancia de fuga y distancia de arco, para así verificar si estos aumentos influyen en la mejora del desempeño dentro de la simulación.

En la Fig. 10 se observa que, al aumentar la tensión equivalente de la nueva altitud, provoca un aumento de la intensidad de campo eléctrico normal máximo, este aumento de altitud representa un incremento del 36% en los valores de campo eléctrico para el caso de 5000 msnm.

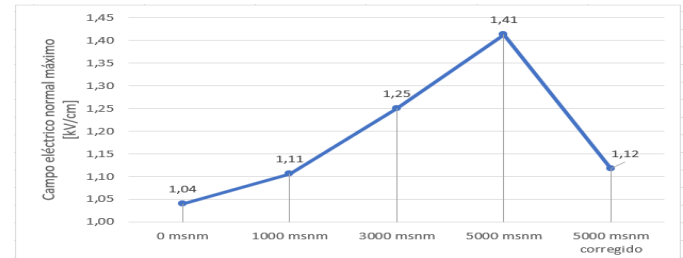


Fig. 10. Valores máximos de campo eléctrico normal a medida que aumenta la altitud de operación.

Basándose en la coordinación de aislamiento [1, 2], se calcularon las dimensiones necesarias del aislador para soportar la nueva tensión representativa de los 5000 msnm, como se muestra en la Tabla VIII.

TABLA VIII
DIMENSIONES NECESARIAS DEL AISLADOR PARA LA ALTITUD DE 5000 MSNM.

Altitud [metros]	Dist. Arc [mm]	Dist. Fuga [mm]	Clase IEC	Dist. Fuga [mm]
0	120 - 160	320	U120B	305
5000	160 - 220	440	U400B	525

Como se observa en la Fig. 10, la intensidad de campo eléctrico máximo disminuye para el caso de utilización del aislador clase U400B, es decir, “5000 msnm corregido”, en un 21% respecto al valor obtenido a los 5000 msnm con el aislador U120B, sin embargo, sigue siendo mayor en un 7,7% respecto al caso a nivel del mar. Como se trata de un régimen capacitivo, con $\omega\epsilon\epsilon_0$ del mismo orden de magnitud de σ_v , la corriente de conducción es despreciable, tal como se concluye en [15], por lo que el desempeño del aislador sigue siendo aceptable.

C. Régimen Resistivo con Variación del SPS

En esta sección se analiza la influencia de la capa conductiva en el régimen resistivo. Los resultados son presentados en la Fig. 11. La distribución de potencial sobre la superficie del aislador tiene un comportamiento más uniforme comparado con el caso capacitivo presentado en la Fig. 6. Según se observa en la Fig. 11, se perdió el régimen capacitivo presentado en la Fig. 6 y se evidencia que existe una conducción a través de la capa de contaminación. Como los gráficos de las distribuciones de campo eléctrico y de potencial son similares para todos los niveles de contaminación, se mostrarán solo los valores del nivel medio de SPS.

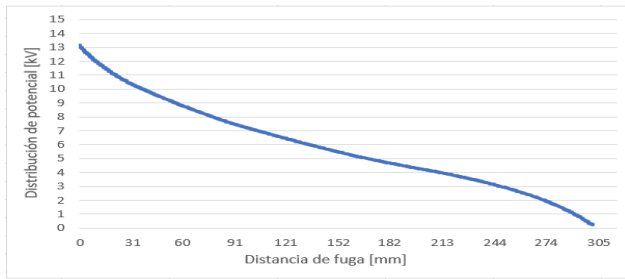


Fig. 11. Régimen resistivo: distribución de potencial característica para los casos de capa conductiva.

Por otro lado, al aumentar el nivel de SPS la intensidad de las corrientes de fuga aumenta, tal como se representa en la Fig. 12, llegándose a obtener una corriente RMS aproximada de 202 mA para el nivel de severidad más alto. Esta tendencia también es observable dentro del estudio realizado por Kademi et al [8].

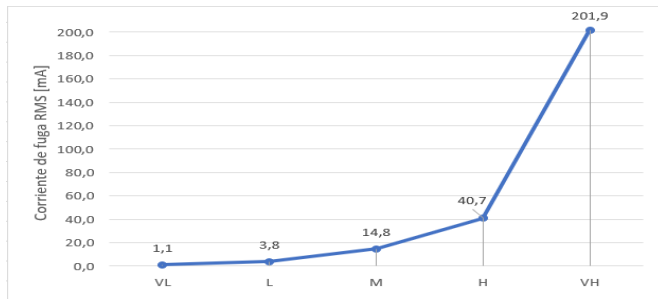


Fig. 12. Corrientes de fuga RMS obtenida para cada nivel de SPS.

En la Fig. 13 se muestran las distribuciones espaciales del potencial y del campo eléctrico, con el objetivo de compararlos con las Fig. 8 y Fig. 9. Se observa que en el régimen resistivo el potencial se distribuye por toda la superficie inferior del aislador, provocando que el campo eléctrico sea más intenso dentro del aislante de vidrio y en el aire, especialmente en las puntas de los pliegues de la falda.

El aumento de la corriente de fuga obtenido de las simulaciones tras un aumento del valor de conductividad de la capa, era un comportamiento esperable, sin embargo, ha sido novedoso conocer los valores de las corrientes obtenidas según el nivel de contaminación, resultado no cuantificado con anterioridad.

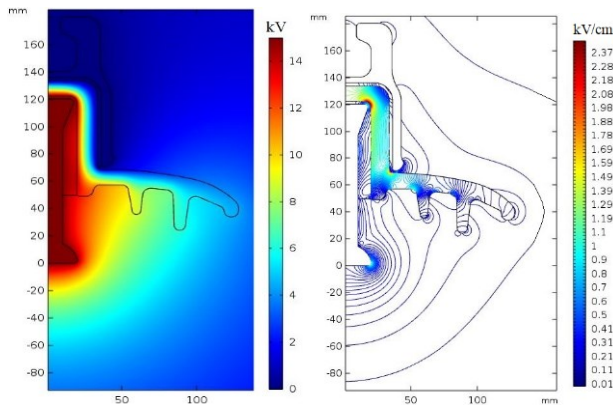


Fig. 13. Caso $\sigma_v = 4.9e-3$ S/m y $d_s = 0,024$ mm. Distribución de potencial eléctrico (izquierda). Distribución de campo eléctrico normal (derecha).

Finalmente, se ha simulado el comportamiento del aislador de clase U400B para comprobar cuanto influencia el aumento de las dimensiones en la conducción de corrientes de fuga, bajo las mismas condiciones anteriores de SPS muy fuerte (VH).

Como se puede observar en la Fig. 14, con el aumento de dimensiones del aislador se disminuyó en un 34,5% la corriente de fuga para el nivel de SPS muy fuerte, es decir que, de un valor de 201,9 mA bajó a una intensidad de 132,2mA. Sin embargo, como se puede comparar con el resultado de la Fig. 12, este valor sigue siendo elevado para alcanzar niveles de corrientes que permitan al aislador regresar al régimen capacitivo, analizado en el régimen del caso electrostático.

Por lo anterior, como trabajo futuro es necesario llevar a cabo una comprobación experimental de estos resultados, midiendo las corrientes de fuga en aisladores de las clases utilizadas en este estudio.

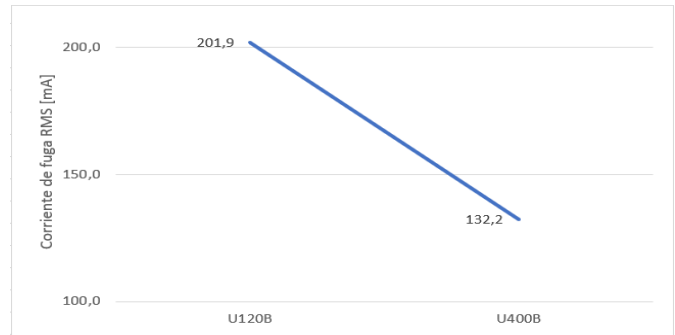


Fig. 14. Comparación de las correcciones realizadas para mejorar el desempeño del aislador bajo el nivel de SPS muy fuerte a 0 msnm, entre perfiles U120B y U400B.

IV. CONCLUSIONES

En este documento se ha analizado el efecto que tienen la contaminación y la altitud en la distribución de potencial, intensidad de campo eléctrico y corrientes de fuga para unidades de aisladores de vidrio, sin pretender que estos resultados intenten generalizar el comportamiento de una cadena de aisladores. El análisis se ha dividido en dos partes, primero el comportamiento del aislador en el régimen capacitivo y segundo el comportamiento en el régimen resistivo.

Dentro del régimen capacitivo, se obtuvo que a medida que se aumentaban las conductividades entre 10^{-6} y 10^{-4} S/m, la intensidad de campo eléctrico presentó un incremento sobre la superficie del aislador y en el espacio alrededor de este, esto provocó una redistribución del potencial eléctrico a través del aislador, notándose una tendencia a cambiar de régimen.

A medida que se aumenta la altitud dentro del régimen capacitivo, también se obtiene un aumento de la intensidad de campo eléctrico. Al realizar el análisis con un aislador de mayores dimensiones para soportar las nuevas condiciones de altitud, se obtiene una intensidad de campo eléctrico 21% menor respecto al análisis sin corregir, manteniéndose de esta forma el régimen capacitivo.

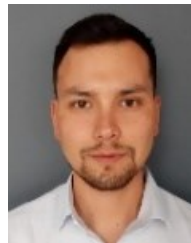
Para el caso del régimen resistivo, con conductividades entre 0,004 S/m y 0,4 S/m, representativas para los distintos niveles de severidad de contaminación (SPS), se obtienen distribuciones de potencial y campo eléctrico muy similares para todas las conductividades de ese rango. Se estudió la intensidad de la corriente de fuga, obteniéndose valores desde 1,1 mA para la menor conductividad, hasta 201,9 mA para la mayor.

Al calcular los valores de las corrientes de fuga para un aislador de mayores dimensiones como lo es el U400B, se obtuvo tan solo una disminución de 34,5% en la corriente, lo que indica que, pese al aumento de las dimensiones, se obtienen resultados de corrientes de fuga aún dentro del régimen resistivo.

Con base en los resultados de las simulaciones, se pudo establecer que el aumento de las dimensiones del aislador no logra mitigar los efectos de la contaminación y la altitud en los rangos analizados. Se sugiere como trabajo futuro, contrastar estos resultados en ensayos de laboratorio, para así corroborar de forma experimental la necesidad de una actualización de la norma IEC 60815, tal como se pudo concluir en la investigación de R. Arias et al [25]. También se sugiere, realizar mediciones que permitan la comparación de corrientes de fuga para distintos tipos de aisladores, con distintos niveles de contaminación y a distintas presiones atmosféricas.

REFERENCIAS

- [1] IEC60071-2, Insulation co-ordination - Part 2: Application guide, International Electrotechnical Commission, 1996.
- [2] IEC60815-2, Selection and dimensioning of high-voltage insulators for polluted conditions - Part 2: Ceramic and glass insulators for a.c. systems, International Electrotechnical Commission, 2002.
- [3] IEC60815-1, Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions - Part 1: Definitions, information and general principles, International Electrotechnical Commission, 2008.
- [4] IEC60507, Artificial pollution tests on high-voltage ceramic and glass insulators to be used on a.c. systems, BSI Standards Limited, 2014.
- [5] S. F. Stefenon, J. P. Américo, R. B. Grebogi y A. Nied, "Analysis of the Electric Field in Porcelain Pin-Type Insulators via Finite Elements Software," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no 10, pp. 2505-2512, 2018.
- [6] A. Arshad, G. Scott y F. Masoud, "Effect of pollution layer conductivity and thickness on electric field distribution along a polymeric insulator," 2015. [En línea]. Available: https://www.comsol.com/paper/download/289991/arshad_paper.pdf [Último acceso: 26 6 2019].
- [7] A. S. Krzma, M. Y. Khamaira y M. Abdulsamad, "Comparative Analysis of Electric Field and Potential Distributions over Porcelain and Glass Insulators Using Finite Element Method," *Proceedings of the First Conference for Engineering Sciences and Technology*, vol. 1, pp. 176-184, 2018.
- [8] M. M. Khademi, A. Arjomand y H. Saedpanah, "Dynamic Calculation of Leakage Current and Electric Field of Distribution Polymeric Insulator Under Pollution Layer," *The 20th Iranian Electrical Power distribution Conference*, pp. 28-29, April 2015.
- [9] M. I. Mousa, Z. Abdul-Malek y I. M. Zainab, "Leakage Current Based Thermal Modeling of Glass Disc Insulator Surface," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 6, no 3, pp. 504-512, 2017.
- [10] Arshad, A. Nekahi, S. G. McMeekin y M. Farzaneh, "Numerical Computation of Electric Field and Potential Along Silicone Rubber Insulators Under Contaminated and Dry Band Conditions," *3D Research Center*, vol. 7, no 25, 2016.
- [11] C. Volat, "Comparison Between the Use of Surface and Volume Conductivity to Compute Potential Distribution along an Insulator in Presence of a Thin Conductive Layer," *IEEE Electrical Insulation Conference*, pp. 409-413, 2-5 June 2013.
- [12] H. P. Mercure, "Insulator Pollution Performance at High Altitude: Major Trends," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no 2, pp. 1461-1468, 1989.
- [13] R. Sundararajan y R. W. Nowlin, "Effect of Altitude on the Flashover Voltage of Contaminated Insulators," *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 433-436, 1996.
- [14] WG-D1.44, Guidelines for Altitude Correction of Pollution Performance of Insulators, CIGRE, 2017.
- [15] E. Asenjo, N. Morales y A. Valdenegro, "Solution of Low Frequency Complex Fields in Polluted Insulators by Means of the Finite Element Method," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 4, no 1, pp. 10-16, 1997.
- [16] IEC60305, Insulators for overhead lines with a nominal voltage above 1000V - Ceramic or glass insulator units for a.c. systems - Characteristics of insulator units of cap and pin type, 4 ed., International Electrotechnical Commission, 1995.
- [17] E. Seran, M. Godefroy, E. Pili, N. Michielsen y S. Bondiguel, "What we can learn from measurements of air electric conductivity in 222Rn-rich atmosphere," *Earth and space science, american geophysical union*, vol. 4, no 2, pp. 91-106, 2017.
- [18] R. A. Serway, Principles of Physics, 2 ed., Saunders College Pub., 1998.
- [19] D. J. McGraw, "The measurement of the dielectric constant of three different shapes of concrete blocks," *IJRAS*, vol. 25, no 3, pp. 82-102, 2015.
- [20] J. Golubovskaya, "The Physics Factbook," Glenn Elert., 2004. [En línea]. Available: <https://hypertextbook.com/facts/2004/JaneGolubovskaya.shtml> [Último acceso: 25 6 2019].
- [21] J. Wardman y T. Wilson, "Volcanic Ash Contamination: Limitations of the Standard ESDD Method for Classifying Pollution Severity," *IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation*, vol. 20, no 2, pp. 414-420, 2013.
- [22] S. Aquil y D. Schmitt, "Dielectric permittivity of clay adsorbed water: Effect of salinity," 2010. [En línea]. Available: https://geoconvention.com/wp-content/uploads/abstracts/2010/0623_GC2010_Dielectric_permittivity_of_clay_adsorbed_water.pdf [Último acceso: 26 06 2019].
- [23] R. Arias, "Insulation failure caused by special pollution around industrial," *Engineering Failure Analysis*, vol. 102, pp. 126-135, 2019.
- [24] WG-C4.303, Outdoor Insulation in Polluted Conditions: Guidelines for Selection and Dimensioning, Part 1: General principles and the AC case, CIGRE, 2008.
- [25] R. Arias y J. Mejia, "The need of creating a new nominal creepage distance in accordance with heaviest pollution 500 kV overhead line insulators," *Engineering Failure Analysis*, vol. 86, pp. 21-32, 2018.



Jersim Araya Salinas, recibió el título de ingeniero electricista de la Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile, en el año 2019. Se ha desempeñado en el área de planificación y mantenimiento eléctrico desde el año 2017.



Johny Montaña (M'00) es profesor a tiempo completo del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica Federico Santa María, Chile. Recibió su título de ingeniero electricista en 1999, M.Sc. en Alta Tensión en 2002 y Ph.D. en Ingeniería Eléctrica en 2006 todos en la Universidad Nacional de Colombia. Sus experiencias laborales incluyen Siemens S.A. (2006–2009) y profesor a tiempo completo en la Universidad del Norte, Colombia (2010–2013). Sus temas de investigación incluyen los sistemas de puesta a tierra, las descargas eléctricas atmosféricas y el estudio de los aislamientos eléctricos.



Roger Schurch nació en Temuco en 1981. Es Ingeniero Civil Electricista de la Universidad Técnica Federico Santa María, año 2006. Trabajó 2 años en Transelec como Analista de Equipos Primarios, para luego comenzar la carrera académica. Obtuvo su doctorado en la Universidad de Manchester, Reino Unido, en el 2014 y se reintegra al Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Santa María, Casa Central, Valparaíso, como profesor en el área de alta tensión. Es miembro de IEEE y CIGRE. Su área de interés en investigación se relacionan con la confiabilidad de aislamientos eléctricos y nuevas técnicas de diagnóstico de equipamiento de potencia, y se mantiene activo en asistencias técnicas a empresas del rubro eléctrico y minero.