

GUI for the Analysis of Direct Flashover Shielding Failure in Overhead Power Lines

José Luis Julca García, Student¹ , Yoel Yonel Rojas Marcelo, Student² ,
Joel Villavicencio Gastelu, Dr.⁴  y Angel E. Obispo, Dr.³ ,

^{1,4} Universidad Tecnológica del Perú, Perú,

c23568@utp.edu.pe

Abstract— *The analysis of the performance of overhead power lines against the direct impact of lightning on phase conductors is a topic of interest in the field of transmission lines. The shielding failure flashover rate (SFFOR) measures this performance. The SFFOR is calculated after solving a set of complex equations, which may result in unintentional errors and require excessive computation time if the calculations are performed manually. In this study, a graphical user interface (GUI) was developed to compute the SFFOR. In contrast to existing similar tools, the developed GUI allows for the modelling of the probability density of the lightning current magnitude from historical data. In addition, the GUI can determine the optimal shielding angle. The equations for the SFFOR computation were obtained from the standard IEEE-1410 and -1253 and brochure 063 of CIGRE. The application of the proposed methodology to a 33 kV overhead power line located at 2700 m.s.n.m. indicated an SFFOR of 0.32 and 0.00 flashovers/100 km-year. The first result was obtained using the parameters of the log-normal function provided in the brochure 063. The second result considered the parameters of the distribution function determined by the proposed method. This shows the sensitivity of the results to the lightning current modelling. Both values were obtained in less than a second after entering the data into the GUI. Therefore, the developed GUI facilitates the analysis of the performance of power transmission shielding, allowing the evaluation of possible shielding improvements in a short time.*

Keywords—Overhead transmission lines, shielding failure, direct flashover, lightning.

GUI para Análisis de Contorneo Directo por Falla de Apantallamiento en Líneas Eléctricas Aéreas

José Luis Julca García, Estudiante¹ , Yoel Yonel Rojas Marcelo, Estudiante² ,

Joel Villavicencio Gastelu, Dr.⁴  y Angel E. Obispo, Dr.³ ,

^{1,4} Universidad Tecnológica del Perú, Perú,

c23568@utp.edu.pe

Resumen—El análisis del desempeño de líneas eléctricas aéreas frente a impactos directos de rayos en los conductores de fase es un tópico de interés en el área de líneas de transmisión eléctrica. La tasa de falla del apantallamiento (SFFOR) es una medida de este desempeño. El SFFOR se calcula después de resolver ecuaciones complejas, las cuales pueden resultar en errores involuntarios y demandar un tiempo de cómputo excesivo si los cálculos son realizados manualmente. En este estudio se desarrolló una interfaz gráfica de usuario (GUI) de acceso abierto para calcular la SFFOR. A diferencia de herramientas computacionales similares, la GUI desarrollada permite el modelamiento de la función de densidad de probabilidad de la corriente de rayo a partir de datos históricos. Además, la GUI permite encontrar el ángulo óptimo de apantallamiento. Las ecuaciones utilizadas dentro de la GUI fueron obtenidas del estándar IEEE-1410 y -1253 y del brochure 063 del CIGRE. La aplicación en una línea eléctrica aérea de 33kV situada a 2700 m.s.n.m. resultó en un SFFOR de 0.32 y 0.00 contorneos/100km-año. El primer resultado fue obtenido utilizando los parámetros de la función log-normal proporcionados en el brochure 063. El segundo resultado consideró los parámetros de la función de distribución determinados por el método propuesto. Esto muestra la sensibilidad de los resultados al modelado de la corriente de rayo. Los resultados anteriores en menos de 1 s luego de ingresar los datos en la GUI. Por tanto, la GUI desarrollada facilita el análisis del desempeño del apantallamiento de líneas eléctricas aéreas, permitiendo la evaluación de posibles mejoras del apantallamiento en un corto tiempo.

Palabras clave—Líneas de transmisión, falla de apantallamiento, contorneo directo, descarga atmosférica, impacto de rayo.

I. INTRODUCCIÓN

A. Contextualización y Planteamiento del Problema

Una de las causas de la salida de servicio de las líneas de eléctricas aéreas es la caída de descargas atmosféricas. Estas descargas pueden impactar directamente en los conductores de fase cuando el cable de guarda de la línea eléctrica no intercepta al rayo (falla de apantallamiento). En el punto de impacto del rayo, se generan ondas de sobretensión, los cuales viajan a lo largo del conductor de fase hasta los aisladores situados en las estructuras de la línea. Dependiendo del valor de la sobretensión, se puede producir un contorneo directo o "flashover" en los aisladores.

La efectividad de los conductores de guarda para interceptar el rayo depende de su ubicación relativa a los conductores de fase. La obtención de la tasa de contorneos por falla de apantallamiento (SFFOR) implica llevar a cabo una serie de cálculos matemáticos complejos. El cálculo manual de estas ecuaciones es laborioso y puede resultar en errores involuntarios. Por ello, es importante desarrollar herramientas computacionales que agilicen el cálculo de del SFFOR. A

partir del valor de esta tasa, se pueden evaluar y proponer alternativas de mejora del apantallamiento de la línea eléctrica frente a las descargas atmosféricas.

B. Revisión Literaria

Para el cálculo de la tasa de contorneos de las líneas eléctricas aéreas, se consideran distintos modelos de rayo, del sistema de conexión a tierra y de los aisladores. Estos modelos permiten describir el comportamiento del sistema frente a descargas atmosféricas y constituyen la base para la estimación de fallas por apantallamiento.

En cuanto a la corriente del rayo, no existe un modelo único que represente todas sus formas de onda, aunque la mayoría de los modelos propuestos presentan características cóncavas. Entre ellos, se encuentra el modelo matemático propuesto por Heidler [1], el cual proporciona una representación analítica de la corriente del rayo, incluyendo tanto el inicio como el final de la onda. Otro modelo es el propuesto por Tapia [2], que emplea una forma de onda lineal con crecimiento constante hasta alcanzar un pico y posterior decrecimiento. De manera complementaria, el modelo de rayo del CIGRE [3] establece formas de onda estandarizadas basadas en datos empíricos y experimentales.

Respecto a la representación de los sistemas de puesta a tierra, se emplean diversos modelos. Uno de ellos corresponde al modelo electromagnético, fundamentado en las teorías de campos y circuitos, el cual considera parámetros eléctricos del suelo que varían con la frecuencia [4], [5]. De manera alternativa, el método de los elementos finitos [6] permite modelar sistemas de puesta a tierra y analizar el comportamiento de los electrodos frente a frecuencias elevadas, verificando la variación de las propiedades eléctricas del sistema.

En relación con el comportamiento de los aisladores frente a descargas atmosféricas, se utilizan distintos modelos orientados a predecir la respuesta de estos componentes ante esfuerzos eléctricos transitorios. Entre los más empleados se encuentran el modelo no lineal, el modelo de descarga parcial y el modelo de progresión del líder [7].

Por otro lado, los criterios normativos desempeñan un papel importante en la evaluación del desempeño del aislamiento. La norma IEC 60071-2 [8] analiza cómo la altitud influye en la capacidad aislante del aire, reduciendo sus propiedades dieléctricas a mayor altura. Para compensar este efecto, la norma propone ecuaciones que permiten ajustar los niveles de aislamiento nominales mediante un factor de corrección.

El cálculo de la tasa de contorneos por fallas de apantallamiento ha sido abordado por organizaciones como el

IEEE y el CIGRE. El IEEE proporciona lineamientos para el cálculo de fallas en líneas de transmisión a través del estándar 1243 [9], mientras que el CIGRE presenta una metodología alternativa en el Technical Brochure 063 [10], donde se detallan procedimientos para la estimación del rendimiento de las líneas de transmisión frente a rayos. Estudios comparativos entre ambas metodologías muestran diferencias en los valores obtenidos de la tasa de contorneos, particularmente para valores elevados de resistencia de puesta a tierra, donde la metodología de la IEEE ofrece valores menores que los obtenidos mediante el enfoque del CIGRE [11].

En este contexto, diversas herramientas computacionales han sido desarrolladas para facilitar el cálculo de la tasa de contorneos por fallas de apantallamiento. La herramienta LIPE fue desarrollada para este propósito [12], mientras que el software IEEE-Flash constituye una aproximación basada en los lineamientos del IEEE. Adicionalmente, el software comercial D.A.T.A. ha sido empleado para la estimación de la SFFOR, así como para la optimización de la altura y ubicación de los cables de guarda en líneas de distribución y transmisión [13]. En trabajos más recientes, el cálculo de la SFFOR se ha implementado mediante scripts en Python, obteniendo resultados aceptables con márgenes de error cercanos al 10% [14].

Asimismo, herramientas desarrolladas en Matlab permiten evaluar la SFFOR considerando distintos modelos de rayo y su influencia en la tasa de fallas disruptivas por apantallamiento. En estos casos, se observa que el aumento del valor medio de la distribución de la corriente pico del rayo conduce a una disminución de la tasa de contorneos. Herramientas del tipo EMPT también han sido utilizados para el cálculo de la SFFOR con entornos de alto rendimiento computacional, incorporando técnicas de computación paralela para reducir los tiempos de cálculo paramétricos y estadísticos [15].

Mayor información sobre los programas de software para la evaluación de la SFFOR puede encontrarse en: LIPE [15], IEEE-Flash [17], TFlash (EPRI) y SIGMA SLP (SADOVIC) [18].

C. Contribución

- Desarrollo de una GUI intuitiva para el cálculo del SFFOR de líneas eléctricas aéreas. Los cálculos están basados en los estándares IEEE-1410 y -1253, así como en el brochure 063 del CIGRE y no requieren el empleo de software del tipo EMTP.
- La GUI es flexible, permitiendo el ingreso de datos históricos para el modelamiento de la corriente del rayo. De esta manera, el valor de SFFOR obtenido reflejará mejor el comportamiento de la línea eléctrica en la zona de interés. Las herramientas tradicionales utilizan estadísticas globales del rayo globales.
- Otra ventaja de la GUI desarrollada es su capacidad para utilizar la función de distribución que mejor se ajusta a las estadísticas locales de la corriente del rayo. Las herramientas tradicionales asumen una función de probabilidad log-normal.
- La GUI puede ser utilizada en ambientes profesionales o educativos, auxiliando a ingenieros y estudiantes en tópicos relacionados con el análisis del apantallamiento de líneas eléctricas aéreas.

II. METODOLOGÍA

La secuencia de cálculos para obtener la SFFOR se resume en la Fig. 1.

A. Datos de Entrada

- **La densidad atmosférica, N_g** , se obtiene normalmente a partir de mediciones en estaciones meteorológicas. No obstante, también es posible calcularla de forma exacta usando (1) [19].

$$N_g = 0.04 \cdot T_d^{1.25}, \quad (1)$$

donde T_d es el nivel isoceraúnico.

- **La altura y las características geométricas de los conductores** se obtienen a partir de los planos y memorias de cálculo durante el diseño. Para líneas existentes, esta información puede obtenerse de los planos “as-built” o mediante mediciones en campo.
- **La resistividad del terreno** se determina a partir de mediciones en campo o de las memorias de cálculo de la línea.
- **La tensión crítica de contorneo (CFO)** del aislador se obtiene de la ficha técnica del mismo.
- **La altitud de instalación** sobre el nivel del mar de las líneas de transmisión es un dato importante por considerar, ya que influye significativamente en la selección de los materiales aislantes.

B. Tasa de Contorneo Directo por Falla de Apantallamiento

Esta tasa representa la cantidad de descargas que impactan en el conductor de fase y generan sobretensiones mayores que la CFO del aislador. De acuerdo con [20], la tasa de contorneo directo por falla de apantallamiento se calcula mediante (2):

$$TCFA = 2N_g L \int_{I_c}^{I_m} D_c f(I) dI, \quad (2)$$

donde L es la longitud de la línea, D_c la distancia de exposición del conductor de fase, $f(I)$ la función de densidad de probabilidad de la corriente, I_c la corriente crítica y I_m la corriente máxima para la cual el valor de D_c es igual a cero.

La corriente crítica corresponde al valor mínimo que debe alcanzar la intensidad de la corriente del rayo para producir contorneo en el aislador. En [21] se realizan simulaciones mediante el software ATP-EMTP para estimar la corriente mínima crítica que provoca una descarga disruptiva por falla de apantallamiento en líneas de transmisión. Su valor se calcula utilizando (3):

$$I_c = \frac{2CFO^*}{Z_c}, \quad (3)$$

donde CFO^* es la tensión crítica de contorneo del aislador corregida por altitud de instalación de la línea eléctrica y Z_c la impedancia característica del conductor.

La corrección por altitud se realiza mediante (4), lo que permite considerar la variación de las propiedades dieléctricas del aire con el aumento de la altitud [8]:

$$K_a = e^{m(\frac{H}{8150})}, \quad (4)$$

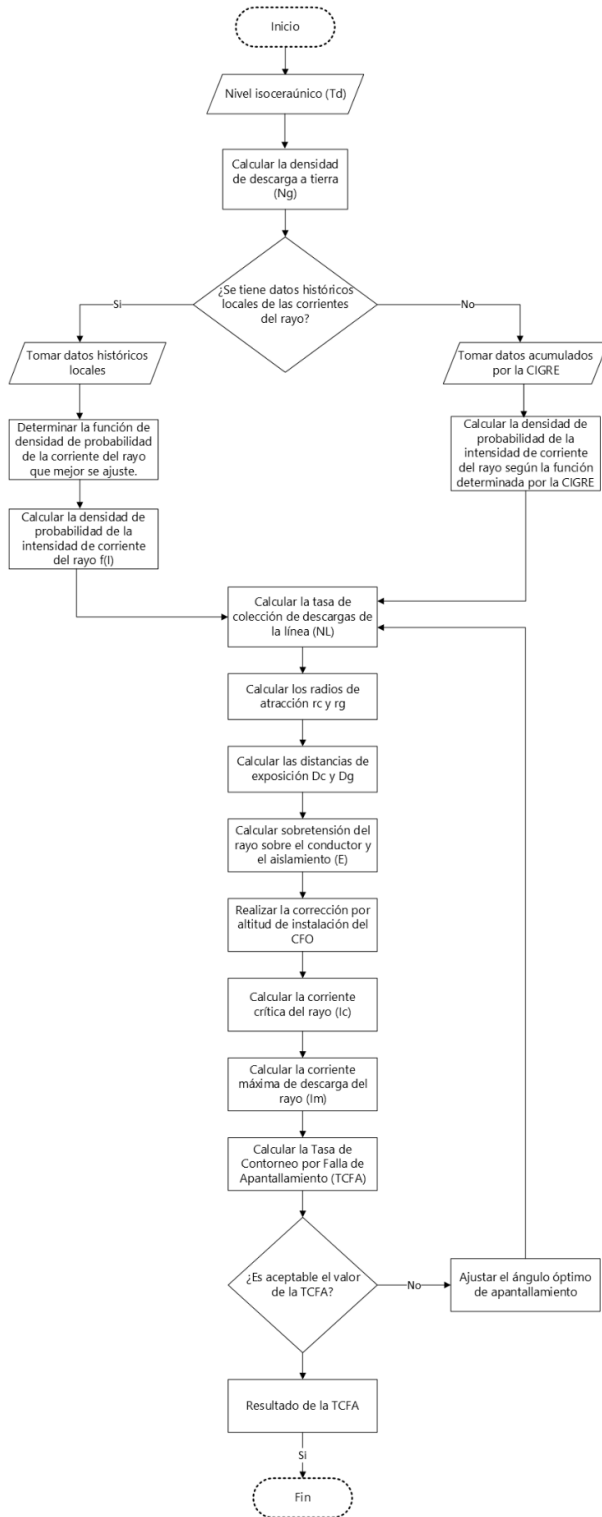


Fig. 1. Diagrama de flujo para el cálculo de la SFFOR.

donde K_a es el factor de corrección por altitud, H es la altitud sobre el nivel del mar, expresada en metros y $m = 1$ para tensiones soportadas de impulso tipo rayo.

Los detalles asociados a la obtención de la corriente máxima y a la función de densidad de probabilidad de la corriente del rayo se presentan en las Secciones II-C y II-D, respectivamente.

C. Distancia de Exposición

La distancia de exposición, D_c , corresponde a la región donde se considera que las descargas atmosféricas descendentes impactan directamente sobre el conductor de fase o guarda. La determinación de esta distancia se realizó en base al modelo electrogeométrico y las distancias de atracción.

- **Modelo electrogeométrico:** El modelo electrogeométrico se basa en las distancias de atracción que se generan alrededor de objetos cuando un rayo descendente se aproxima. La Fig. 2 muestra los radios de atracción de un conductor de fase, conductor de guarda y del terreno.

- **Radio de atracción del rayo:** El radio de atracción de los objetos depende de la intensidad del rayo. El cálculo de estos radios para los conductores de fase y guarda viene dada por (5), y para el caso del terreno, su distancia de atracción se calcula usando (6). Estas ecuaciones son tomadas del TB 63 de CIGRE [11].

$$r_c = 7.1I^{0.75}, \quad (5)$$

$$r_g = 6.4I^{0.75}, \quad (6)$$

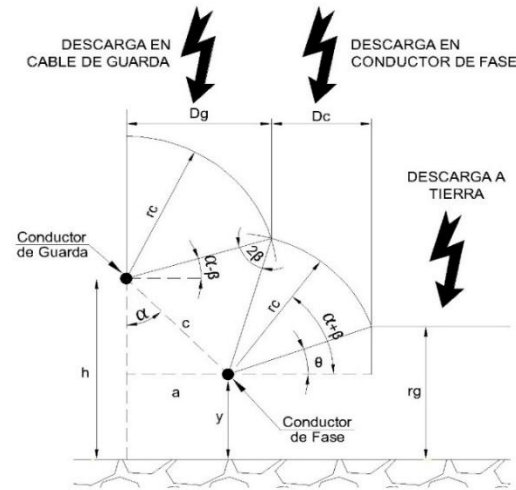


Fig. 2. Modelo electrogeométrico y radios de atracción

donde r_c es el radio de atracción de los conductores de guarda y de fase, r_g es el radio de atracción del suelo y I es la densidad de probabilidad de la corriente del rayo.

Considerando los radios de atracción y la geometría de la línea mostrada en la Fig. 2, se obtienen las siguientes ecuaciones para las distancias de exposición del conductor de fase más expuesto y del conductor de guarda, respectivamente.

$$D_c = r_c [\cos \theta - \cos(\alpha + \beta)], \quad (7)$$

$$D_g = r_c [\cos(\alpha + \beta)]. \quad (8)$$

Siendo:

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{c}{2r_c} \right), \quad (9)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{r_g - y}{r_c} \right), \quad (10)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{a}{h-y} \right), \quad (11)$$

donde D_c es la distancia de atracción del conductor de fase, D_g es la distancia de atracción del conductor de guarda, y es la altura del conductor de fase, h es altura del cable de guarda y c la distancia entre el conductor de guarda y el conductor de fase.

- **Corriente máxima:** Es el valor de intensidad de corriente del rayo en la que la distancia de exposición es igual a cero. Este valor puede ser obtenido iterativamente usando (7). Para ello, se evalúa el valor de D_c a partir de valores pequeños de intensidad de corriente de rayo. El valor de esta corriente se va aumentando hasta que el valor de D_c es prácticamente igual a cero. En ese punto, I_m representa la corriente máxima, a partir de la cual no se producirán descargas en el conductor de fase.

D. Función de Densidad de Probabilidad de la Corriente de Rayo

En la referencia [22] se examinaron los parámetros de los rayos utilizados en diversas aplicaciones de ingeniería, incluyendo los datos del CIGRE TB 549 (2013). Se analizó la influencia de las variaciones geográficas y estacionales en los parámetros del modelo de rayos. El estudio señala que el tamaño limitado de las muestras y la información disponible no son suficientes para confirmar o refutar la hipótesis sobre la dependencia de los parámetros de los rayos descendentes de polaridad negativa en relación con la ubicación geográfica o la estación del año.

Tal como se mostró en (2), la SFFOR depende de la función de densidad de probabilidad de la intensidad de corriente del rayo, $f(I)$. Generalmente, la $f(I)$ se modela usando una función de densidad de probabilidad log-normal cuyos parámetros de ajuste se indican en [11, 20]. Sin embargo, tales parámetros fueron obtenidos de registros de intensidad de rayo recogidos alrededor del mundo, por lo que su uso para zonas específicas podría llevar a resultados inexactos. En ese sentido, se desarrolló una herramienta que permite obtener la función de densidad de probabilidad de la distribución de la corriente del rayo considerando los datos históricos locales.

La GUI concebida identifica la función de densidad de probabilidad que mejor se ajusta a los datos históricos de las corrientes del rayo. Las funciones evaluadas para tal fin son las funciones gamma, normal, log-normal y exponencial. Los parámetros de ajuste de las funciones evaluadas se obtienen usando la técnica de estimación de máxima verosimilitud (MLE) [23, 24]. Dicha técnica ofrece resultados más precisos de los parámetros. La ecuación para la obtención de ajuste se muestra en (12).

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \sum_{i=1}^n \log f(I_i | \theta) = 0, \quad (12)$$

donde $f(I)$ es la función de densidad de probabilidad de la corriente del rayo y θ es el parámetro o vector de parámetros a estimar.

Una vez estimados los parámetros de cada una de las distribuciones evaluadas mediante máxima verosimilitud, se procede a seleccionar el modelo estadístico que mejor representa los datos históricos de la corriente del rayo. Para ello, la GUI compara cuantitativamente las distribuciones ajustadas y selecciona aquella que presenta el mejor desempeño según un criterio estadístico de selección de modelos.

Para ello, se emplea el criterio de información de Akaike (AIC), el cual permite comparar distintos modelos probabilísticos considerando simultáneamente la calidad del ajuste y la complejidad del modelo. Este criterio resulta especialmente adecuado para la comparación de distribuciones continuas no anidadas, como la distribución normal, log-normal, gamma y exponencial.

$$AIC = 2k - 2 \ln(\mathcal{L}) \quad (13)$$

donde k es el número de parámetros del modelo y $\mathcal{L}$ es el valor máximo de la función de verosimilitud. El modelo probabilístico seleccionado es aquel que presenta el menor valor de AIC, garantizando una elección objetiva y consistente con los datos históricos locales.

E. Ángulo Óptimo de Apantallamiento

En [25] se evaluó la aplicabilidad de diferentes modelos de distancias de atracción del rayo en los cálculos del ángulo óptimo de apantallamiento (α_p) en líneas de transmisión. Los resultados muestran una gran variabilidad en el valor de α_p entre los modelos analizados. Sin embargo, todos los modelos son consistentes en predecir α_p más pequeños a medida que aumenta la altura de la línea de transmisión.

El ángulo óptimo de apantallamiento se alcanza cuando la SFFOR es igual a cero. Esto se logra cuando $I_c = I_m$ en (2). En este estudio, el ángulo óptimo de apantallamiento se determina utilizando el modelo electrogeométrico [20]. En dicho modelo, primero se calcula la distancia horizontal a_p correspondiente al apantallamiento perfecto mediante (13):

$$a_p = \sqrt{r_c^2 - (r_g - h)^2} - \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2}. \quad (14)$$

Posteriormente, el ángulo de apantallamiento se obtiene usando (14):

$$\alpha_p = \tan^{-1} \frac{a_p}{h - y}. \quad (15)$$

F. Desarrollo de la GUI

La interfaz gráfica de usuario (GUI) fue desarrollada en lenguaje de programación Python debido a que es un lenguaje de programación abierto y de fácil aprendizaje. Esto permite que la GUI desarrollada pueda ser usada sin restricciones en ambientes académicos. Las librerías utilizadas para el desarrollo de la GUI son el Tkinter, el numpy y el matplotlib. El Tkinter permite crear la interfaz gráfica. El numpy facilita los cálculos matemáticos. El matplotlib facilita la generación de gráficos de las variables de interés obtenidas durante los cálculos.

La GUI se caracteriza por realizar automáticamente los cálculos necesarios para obtener la SFFOR a partir de los datos ingresados por el usuario. Esto permite que ingenieros, docentes o estudiantes analicen rápidamente diversas propuestas de mejora del desempeño de la línea eléctrica. A diferencia de otros trabajos encontrados en la literatura especializada, la GUI admite el ingreso de datos históricos de las intensidades de corriente de rayo, a partir del cual determina la función de distribución y sus parámetros de ajuste que mejor se ajustan a dichos datos. Además, la GUI calcula el ángulo óptimo de apantallamiento α_p , la corriente crítica de contorno I_c y la corriente máxima del rayo I_m .

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La metodología presentada para el cálculo del SFFOR fue aplicado a una línea eléctrica aérea de 33kV, circuito simple, localizada a una altitud de 2700 m.s.n.m. La Fig. 3 muestra el entorno de usuario de GUI desarrollada para el cálculo del SFFOR.

Fig. 3. Entorno de la interfaz gráfica de usuario (GUI) desarrollada.

Se observa que la GUI solicita datos básicos de la zona de instalación, así como las características geométricas de los conductores de fase y guarda. Además, se observa que no es necesario ingresar la información de todos los conductores, sino de aquel más expuesto. La determinación de este conductor más expuesto se realizó siguiendo la explicación presentada en la Sección II-C.

La Fig. 4 muestra los datos ingresados a la GUI para el cálculo del SFFOR de la línea eléctrica bajo análisis.

Fig. 4. Carga de datos de la línea eléctrica en la GUI.

Debido a que la GUI desarrollada ofrece la posibilidad de carga de datos históricos locales de la corriente de rayo en la zona de interés, se analizaron dos casos:

Caso 1: cálculo del SFFOR usando los datos históricos de corriente de rayo presentados en el brochure 063 del CIGRE.

Caso 2: cálculo del SFFOR usando datos históricos de la corriente del rayo por donde recorre la línea eléctrica bajo estudio.

A. Resultados

Caso 1

La Fig. 5 presenta los resultados de la tasa de contorneos obtenida usando los parámetros del rayo indicado en el brochure 063 del CIGRE. En este caso, el SFFOR obtenido fue de 0.32 contorneos/100km-año.

Fig. 5. Resultados obtenidos considerando los parámetros del rayo indicados en el brochure 063 del CIGRE.

Caso 2

La Fig. 6 muestra la curva de la función de probabilidad que mejor se ajustó a los datos históricos locales de la corriente de rayo en la zona por donde recorre la línea eléctrica bajo estudio. En este caso particular, la GUI determinó que la distribución log-normal es la distribución que mejor se ajusta a los datos. Los parámetros así determinados para esta función de probabilidad son $M = 6.12$ y $\beta = 0.77$.

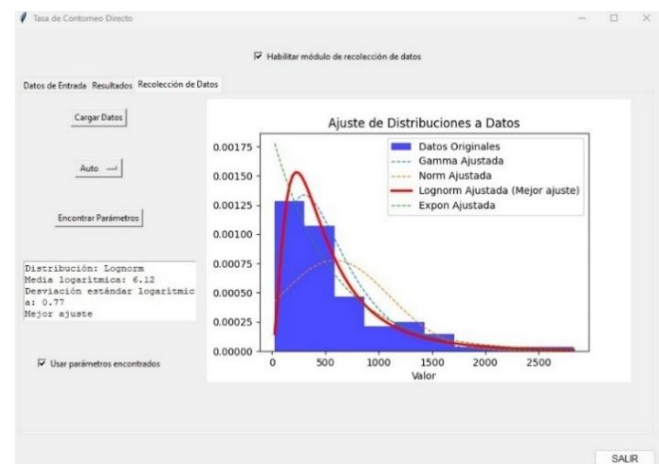


Fig. 6. Función que mejor se ajusta a los datos históricos locales.

En este estudio, la selección de la función de distribución se realizó mediante el criterio de información de Akaike (AIC), lo que permitió una elección objetiva del modelo probabilístico y una mejor representación de las características estadísticas locales de la corriente de rayo.

En la Fig. 7 se presenta el resultado encontrado del SFFOR para la línea eléctrica bajo análisis, el cual tiene un valor de 0.00 contorneos/100km-año.



Fig. 7. Resultados obtenidos en base a registros históricos locales.

Es importante notar que además del valor de SFFOR, la GUI también muestra los resultados del ángulo óptimo de apantallamiento α_p , la corriente crítica I_c y la corriente máxima I_m . La Tabla I permite comparar los parámetros eléctricos y geométricos relevantes, así como la tasa de contorneos obtenida en el Caso I y Caso II.

TABLA I. COMPARACIÓN DE RESULTADOS BASADOS EN DATOS DE CIGRE Y REGISTROS HISTÓRICOS LOCALES

Parámetros	Resultados	
	CIGRE $3 \leq I_m \leq 20 \text{ kA}$	GUI propuesta (Históricos locales)
Densidad de probabilidad de corriente de rayo $f(I)$		
Función que mejor se ajusta	Log-normal	Log-normal
Mediana (M)	61.1	6.12
Desviación estándar (β)	1.33	0.77
Densidad de descargas al año (N_g), medida en descargas/km²-año	1.18	1.18
Colección de descarga de línea (N_l), medida en descargas/km-año	17.03	17.03
Corriente crítica (I_c), en kA	1.08	1.08
Corriente máxima (I_m), en kA	8.58	8.58
Ángulo óptimo de apantallamiento (α_p)	0.54°	0.54°
SFFOR, medida en desconexiones/100km-año	0.32	0.00

Los registros históricos locales de la corriente de rayo se ajustaron mejor a una distribución log-normal, coincidiendo con la distribución de probabilidad utilizada por CIGRE. No obstante, los parámetros de estas distribuciones son diferentes, lo cual se refleja en los valores diferentes de SFFOR encontrados (0.32 y 0.00 contorneos/100 km-año, respectivamente).

Los resultados evidencian que la tasa de contorneos es sensible a la función de probabilidad y parámetros de ajuste del modelo adoptado para la caracterización de la corriente pico del rayo. Aun cuando en ambos casos se obtuvo una función de distribución log-normal como mejor ajuste, las diferencias en sus parámetros de ajuste derivados de registros locales y globales generan variaciones significativas en el valor final del SFFOR.

B. Discusión

Los resultados de SFFOR obtenidos con la GUI desarrollada en este estudio fueron comparados con los resultados del IEEE-Flash y del procedimiento del CIGRÉ. El cuadro resumen comparativo se muestra en la Tabla II.

TABLA II. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL SFFOR

Parámetros	Resultados		
	CIGRE	GUI propuesta (Históricos locales)	IEEE Flash
Densidad de descargas al año (N_g), medida en descargas/km²-año	1.18	1.18	1.18
Colección de descarga de línea (N_l), medida en descargas/km-año	17.03	17.03	N.I.
Corriente crítica (I_c), en kA	1.08	1.08	1.65
Corriente máxima (I_m), en kA	8.58	8.58	19.18
Ángulo óptimo de apantallamiento (α_p)	0.54°	0.54°	2.0°
SFFOR, medida en desconexiones/100km-año	0.32	0.00	0.18

Nota: N.I.: No Indicado

La SFFOR calculada mediante IEEE-Flash fue de 0.18 contorneos/100 km-año, mientras que, al aplicar la distribución de corriente pico del rayo según el modelo CIGRE, se obtuvo un valor de 0.32 contorneos/100 km-año. Por su lado, la GUI determinó un valor de 0.00 contorneos/100 km-año.

Un valor de SFFOR igual a cero no implica la inexistencia absoluta de eventos de flameo en la línea analizada. Este resultado indica que, bajo las condiciones geométricas, eléctricas y estadísticas consideradas, la probabilidad anual de ocurrencia de contorneos es despreciable. Este comportamiento ha sido reportado previamente en líneas con elevados niveles de apantallamiento y bajas corrientes críticas.

Por otro lado, en relación con la corriente crítica, I_c , los valores calculados mediante el programa IEEE-Flash y la GUI desarrollada presentan valores próximos. Los valores obtenidos fueron de 1.65kA y 1.08kA, respectivamente.

En relación con la corriente máxima, I_m , los valores obtenidos presentaron diferencias: IEEE-Flash estimó 19.18 kA, mientras que la GUI obtuvo 8.58 kA. La diferencia en los valores de I_m se debe en parte a que las metodologías utilizan expresiones matemáticas diferentes para el cálculo de las distancias de atracción del rayo. Específicamente, en la metodología propuesta se considera una ecuación para el radio de atracción de los conductores y otra para el radio de atracción del terreno. Por su lado, en el IEEE-Flash se emplea la misma ecuación tanto para los conductores y el terreno.

En cuanto al ángulo óptimo de apantallamiento (α_p), la GUI encontró un valor de 0.54°, mientras que el IEEE-Flash 2.0°. Las diferencias entre los valores son nuevamente debido al uso de expresiones matemáticas diferentes en el cálculo de los radios de atracción del rayo, lo que resulta en valores de radios diferentes en cada metodología. Estos radios son considerados en el cálculo del ángulo de apantallamiento óptimo razón por la cual se obtienen valores diferentes.

La diferencia en los resultados del SFFOR entre los programas de cálculo se debe principalmente a la función de probabilidad y sus parámetros considerados para modelar los datos de la corriente pico de rayo. También se deben a las ecuaciones matemáticas empleadas por cada metodología a la hora de obtener los valores de I_c e I_m .

IV. CONCLUSIONES

En este estudio se desarrolló una interfaz gráfica de usuario (GUI) para el cálculo automatizado de la tasa de contorno por falla de apantallamiento (SFFOR) de líneas eléctricas aéreas. La GUI fue desarrollada usando script de Python, en los cuales se implementaron los cálculos indicados por el estándar IEEE-1410 y -1253, así como el brochure 063 del CIGRE. A partir de la aplicación a una línea eléctrica aérea de 33 kV, circuito simple, ubicada a 2700 m.s.n.m., se obtuvieron las siguientes conclusiones.

La GUI desarrollada se caracteriza por su facilidad de uso e interfaz intuitiva permitiendo el cálculo del SFFOR a partir de parámetros del rayo definidos por normas internacionales IEEE o CIGRE. Además, la GUI permite obtener parámetros relevantes como la densidad de descargas a tierra al año (N_g), la colección de descarga de línea (N_L), la corriente crítica mínima de contorno (I_c), la corriente máxima del rayo (I_m) y el ángulo óptimo de apantallamiento (α_p).

Un aporte relevante de esta investigación es la incorporación de datos históricos locales de corriente del rayo en el cálculo del SFFOR. Los resultados evidencian que el uso de información estadística local puede resultar en una SFFOR diferente en comparación con el uso de parámetros globales propuestos por el CIGRE, aun cuando la función de distribución resultante sea del mismo tipo.

La GUI no se limita a la utilización de una distribución log-normal predefinida, sino que permite evaluar múltiples funciones de densidad de probabilidad. La selección del modelo estadístico se realiza mediante el método de máxima verosimilitud y el criterio de información de Akaike (AIC), garantizando una elección objetiva y consistente con los datos históricos disponibles. Este enfoque permite representar de manera más realista las características estadísticas de la corriente del rayo y resalta la alta sensibilidad del SFFOR al modelo probabilístico adoptado.

La GUI desarrollada constituye una plataforma flexible para el análisis del desempeño frente a descargas atmosféricas en líneas aéreas, pudiendo ser utilizada en diseños de ingeniería o en cursos de ingeniería eléctrica.

Los resultados obtenidos mediante la GUI desarrollada fueron comparados con el programa IEEE-Flash. Se observó que los valores del SFFOR presentan diferencias moderadas entre los distintos programas, atribuibles principalmente a las metodologías de modelado del rayo y a las ecuaciones matemáticas empleadas para determinar los radios de atracción de rayo de conductores y del terreno.

REFERENCIAS

- [1] B. R. Terespolsky, H. G. Hunt, and K. J. Nixon, "An Approximation to the Heidler Function With an Analytical Integral", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, pp. 1-15, 2024.
- [2] E. Bullich, "Protección contra sobretensiones por descargas atmosféricas a tierra mediante pararrayos en líneas aéreas de media tensión", UPC Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, pp. 1-94, febrero del 2013.
- [3] Z. G. Datsios, D. G. Patsalis, P. N. Mikropoulos, and T. E. Tsovilis, "Effects of Approximating Recorded Lightning Currents With CIGRE Waveforms on Computed Fast-Front Overvoltages and Critical Lightning Currents Causing Flashover to Overhead Transmission Lines", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 38, pp. 3084 – 3094, October 2023.
- [4] L. Grcev and M. Popov, "On high-frequency circuit equivalents of a vertical ground rod", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, pp. 1598-1603, April 2005.
- [5] J. S. Leon, R. A. Ribeiro, M. A. De Oliveira, J. Pissolato and S. Kurokawa, "The Impact of Transmission Line Modeling on Lightning Overvoltage", *Energies*, Vol. 16, pp. 1343, January 2023.
- [6] B. Salarieh, J. De Silva and B. Kordi, "High frequency response of grounding electrodes: Effect of soil dielectric constant", *IET Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 14, pp. 2915-2921, August 2020.
- [7] CIGRE Working Group 07, "Guide for the evaluation of the dielectric strength of external insulation", Study Committee 33, Technical Brochure 72, 1992.
- [8] IEC Std 60071-2, "Insulation co-ordination – Part 2: Application guide", Third edition, Switzerland, 1996.
- [9] IEEE Std 1243-1997, "Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines", USA, June 1997.
- [10] IEEE Std 1410-2004, "Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines", USA, September 2010.
- [11] CIGRE Working Group 01 (Lightning), "Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines", Study Committee 33, Technical Brochure 63, 1991.
- [12] E. S. D. A. Abrantes, "Lightning Performance of Transmission Lines", Instituto Superior Técnico of the University of Lisbon, pp. 1-12, October 2016.
- [13] P. Salazar, "Diseño Óptimo de Apantallamiento de Lineas de Transmisión de Alto Voltaje y Extra Alto Voltaje", Escuela Politécnica Nacional, pp. 12-18, 2016.
- [14] R. Hariadi and F. Murdiya, "Analysis of Lightning Performance on 345 kV Transmission Lines Using Python Programming", *International Journal of Electrical, Energy and Power System Engineering*, Vol. 3, pp. 65-76, October 2020.
- [15] P. N. Mikropoulos, T. E. Tsovilis and D. E. Zlitidis, "Software Development for the Evaluation of the Lightning Performance of Overhead Transmission Lines," 45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010, Cardiff, UK, pp. 1-6, 2010.
- [16] J. Martínez, J. Corea and S. Bedoui, "Lightning performance analysis of transmission lines using the Monte Carlo method and parallel computing", *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, Vol. 26, pp. 398-409, 2018.
- [17] T. Thanasaksiri, "Comparison of CIGRE Method and IEEE-Flash Software for Back-flashover Rate Calculations", *Procedia Computer Science*, Vol. 86, pp. 445-448, March 2016.
- [18] G. Rojas, "Líneas de transmisión y distribución puesta a tierra", *boletín N°86*, pp. 1-10, noviembre 2020.
- [19] J. Villavicencio, "Modelado del desempeño de líneas aéreas de transmisión y distribución ante descargas atmosféricas", Tesis de Grado, UNI, Lima-Perú, 2013.
- [20] A. Hileman, "Insulation coordination for Power System", New York, USA: Tylor & Francis Group, 1999.
- [21] Z. G. Datsios, P. N. Mikropoulos and T. E. Tsovilis, "Estimation of the minimum shielding failure flashover current for first and subsequent lightning strokes to overhead transmissions lines", *Electric Power Systems Research*, Vol. 113, pp. 141-150, August 2014.
- [22] V. A. Rakov, "Lightning Parameters for Engineering Applications: Recent Updates and Outlook", Department of Electrical and Computer Engineering, University of Florida, Florida, USA, 2013.
- [23] Y. Pawitan, "In All Likelihood: Statistical Modelling and Inference Using Likelihood", Oxford, UK: Oxford University Press, 2001.
- [24] I. J. Myung, "Tutorial on Maximum Likelihood Estimation", *Journal of Mathematical Psychology*, Vol. 47, pp. 90-100, 2003.
- [25] P. N. Mikropoulos and T. E. Tsovilis, "Lightning attachment models and perfect shielding angle of transmission lines," 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Glasgow, UK, pp. 1-5, 2009.

