

Métodos recomendados para mejorar el comportamiento de las líneas de distribución aéreas ante la incidencia de las descargas atmosféricas

Carlos Romualdo Torres
crt@iie.org.mx

Antonio Escamilla Paz
aep@iie.org.mx

Instituto de Investigaciones Eléctricas

Resumen — El nivel de aislamiento en las redes aéreas y subterráneas de distribución es mucho menor que el de las líneas de transmisión. Las fallas causadas por las descargas atmosféricas en las líneas de distribución resultan ser más críticas debido a que la línea puede ser afectada, no sólo por el impacto directo de una descarga, sino también por los sobrevoltajes inducidos causados por los rayos que inciden en las cercanías de la línea.

En este artículo se describen diferentes tipos de protección que probablemente puedan utilizarse para mejorar el comportamiento de las líneas de distribución ante la incidencia de las descargas atmosféricas directas e indirectas.

Palabras clave— Fallas de blindaje y por flameos inversos, resistencia de conexión a tierra, voltajes inducidos, supresores de sobretensiones.

I. INTRODUCCIÓN

Debido a que el nivel de aislamiento en las redes aéreas y subterráneas de distribución es mucho menor que el de las líneas de transmisión, las fallas por descargas atmosféricas en las líneas de distribución resultan ser más críticas debido a que la línea puede ser afectada, no sólo por el impacto directo de una descarga, sino también por los sobrevoltajes inducidos de rayos en las cercanías de la línea. Considerando que, tan sólo en los niveles de hasta 34.5 kV la CFE cuenta con una longitud en líneas de distribución de aproximadamente 672,148 km [5]. y que los requerimientos en cuanto a la calidad de la energía suministrada son cada vez más demandantes, es imperativo contar con una referencia práctica para identificar, conocer y aplicar las medidas de protección que resulten ser las más apropiadas para incrementar la confiabilidad de las líneas de distribución ante el efecto de las tormentas eléctricas.

En las siguientes secciones se describen los tipos de protección que probablemente puedan utilizarse para mejorar el comportamiento de las líneas de distribución ante la incidencia de las descargas atmosféricas directas e indirectas.

II. RECOMENDACIONES SOBRE EL ÁNGULO DE BLINDAJE

Para asegurar que todos los rayos terminen en el cable de guarda, en vez de los conductores de fase, se recomienda un ángulo de blindaje de 45° o menor.

Esta consideración solamente es válida para líneas con una altura menor de 15 m y con un espaciamiento entre conductores de 2 m. Las líneas con mayor altura requieren ángulos de blindaje menores [1, 2].

En áreas donde existen líneas de distribución con ángulos de 45°, cuyo comportamiento es bueno, se puede continuar con esta práctica. Para nuevas líneas de distribución también se pueden considerar ángulos menores que 30° para mejorar la calidad de la energía en líneas existentes.

Para cualquier configuración de conductores, el ángulo de blindaje de 10° presenta la reducción más grande del índice de fallas aterrizando el hilo de guarda en cada estructura [3].

Sin embargo, tener un ángulo de blindaje tan pequeño implica la necesidad de elevar el hilo de guarda a una gran altura sobre los conductores de fase, lo cual es poco práctico, tanto por la parte de diseño de la estructura como por la implicación económica resultante.

III. REQUERIMIENTOS DEL AISLAMIENTO Y EL EFECTO DEL ATERRIZAMIENTO

La efectividad del hilo de guarda depende en gran parte del aislamiento proporcionado entre la guía de bajada hacia tierra y los conductores de fase. Si la bajada a tierra se encuentra en contacto directo con el poste, en toda su longitud, es difícil proporcionar un aislamiento adecuado y también es altamente dependiente del aterrizamiento (puesta a tierra).

Si el voltaje crítico de flameo (VCF) es menor que 200 kV, el valor de la resistencia de conexión a tierra debe ser menor que 10 Ohms.

Si el VCF se encuentra entre 300 kV y 350 kV, con una resistencia de conexión a tierra (Rg) de 30 Ohms se obtendrá un comportamiento similar [2].

La Figura 1 muestra el comportamiento de una línea de distribución debido a los rayos directos, y el efecto de la resistencia de conexión a tierra [2]. Los resultados obtenidos son para una línea de distribución de 10 m de altura, con un hilo de guarda, voltajes críticos de flameos de 175 kV y 350 kV, con una longitud del claro de 75 m y para una densidad de rayos a tierra de 1 rayo/km²/año.

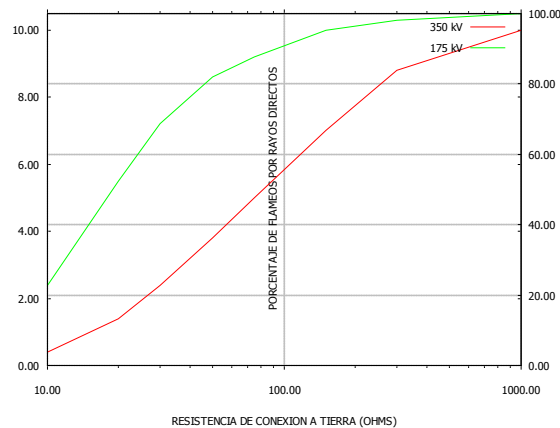


Figura 1. Efecto de la resistencia de conexión a tierra sobre el comportamiento del hilo de guarda (mostrado como un índice de salidas y como eficiencia de protección) [2].

Los resultados obtenidos son para una línea de distribución de 10 m de altura, con un hilo de guarda, voltajes críticos de flameos de 175 kV y 350 kV, con una longitud del claro de 75 m y para una densidad de rayos a tierra de 1 rayo/km²/año.

En relación con la resistencia de conexión a tierra, se recomienda apegarse a los valores establecidos por la Norma de Distribución [4], utilizando, en caso necesario, rellenos químicos u otros compuestos para la reducción de la resistividad aparente del terreno y también adoptar o continuar con programas de verificación del valor de la resistencia de la conexión a tierra así como la efectividad de las conexiones entre los cables y los electrodos, sobre todo en zonas con ambientes corrosivos.

IV. SUPRESORES DE SOBRETENSIONES

Para eliminar virtualmente los flameos en las líneas de distribución, se puede utilizar el hilo de guarda y supresores de sobretensiones en cada fase y en cada poste de la línea. Los supresores de sobretensiones protegerán a la línea de los flameos inversos; el hilo de guarda enviará la mayor parte de la corriente hacia tierra y de esta manera los supresores de sobretensiones no estarán sujetos a mucha energía de entrada. Los supresores de sobretensiones hacen que los diseños de las líneas de distribución con hilo de guarda sean menos dependientes del nivel del aislamiento y del aterrizamiento.

V. PROTECCIÓN DE LAS LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN CON SUPRESORES DE SOBRETENSIONES

Los supresores de sobretensiones de distribución son utilizados efectivamente para proteger el aislamiento de los equipos, tales como: transformadores y reguladores. Los supresores de sobretensiones funcionan como una impedancia alta a voltajes normales de operación y como una impedancia baja durante condiciones de sobretensiones.

Los supresores de sobretensiones conducen a las corrientes hacia tierra mientras que también limitan los voltajes en los equipos a la suma del voltaje de descarga de los

supresores de sobretensiones más el voltaje inductivo desarrollado por la corriente de descarga en la conexión del conductor de fase hacia los supresores de sobretensiones y del supresor de sobretensiones y las conexiones de la bajada hacia tierra.

Para la protección de equipos (especialmente cables subterráneos), algunas veces es necesario seleccionar un supresor de sobretensiones con el menor nivel de protección posible. Para la protección del aislamiento de la línea, esto no es necesario porque el nivel de protección del supresor de sobretensiones es, por lo general, más bajo que el nivel del aislamiento de la línea.

VI. FLAMEOS POR RAYOS DIRECTOS

La protección de las líneas de distribución contra las descargas directas es difícil debido a las altas corrientes, también por lo escarpado de los frentes de ondas y a la alta energía contenida en cada descarga. En teoría los supresores de sobretensiones pueden proporcionar protección contra los rayos directos, pero deben ser utilizados en intervalos muy cortos (virtualmente en cada poste). La Figura 2 muestra la estimación para el espaciamiento entre los supresores de sobretensiones para proteger contra rayos directos [2]. De acuerdo con los resultados ilustrados en la Figura 2, se asume que el neutro está aterrizado en cada poste. El alto número de flameos puede ser engañoso donde el neutro no está aterrizado, excepto en los postes donde existen supresores de sobretensiones instalados en las tres fases y el nivel de aislamiento del neutro a tierra es alto.

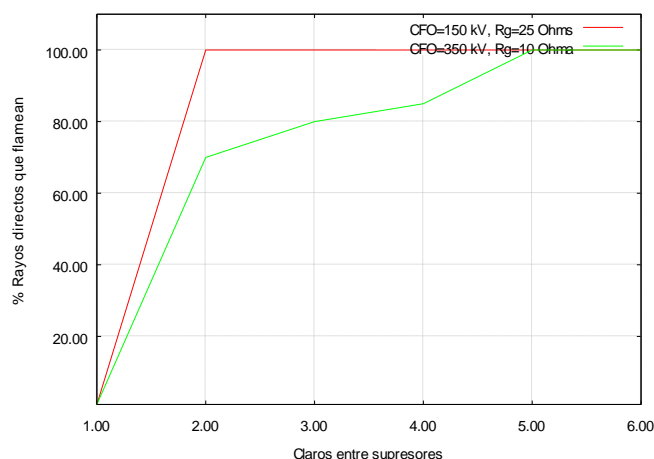


Figura 2. Efectividad del espaciamiento entre supresores de sobretensiones para la protección contra rayos directos [2].

Los resultados obtenidos son para una línea de distribución de 10 m de altura, con un hilo de guarda, voltajes críticos de flameo de 150 kV ($R_g = 25$ Ohms), 350 kV ($R_g = 10$ Ohms), con una longitud del claro de 75 m y una densidad de rayos a tierra de 1 rayo/km²/año.

VII. FLAMEOS POR RAYOS INDIRECTOS

Los supresores de sobretensiones pueden reducir grandemente los índices de flameos debido a los voltajes

inducidos por rayos cercanos a las líneas de distribución. En la Figura 3 se muestran resultados para un voltaje crítico de flameo $V_{CF} = 150$ kV para un circuito sin aterrizar [2]. En este caso, aun cuando existe una separación relativamente grande entre los supresores de sobretensiones instalados pueden reducir significativamente los flameos debidos a los voltajes inducidos, (la separación de 8 claros proporciona una reducción de por lo menos el 25 % de los flameos). En muchos circuitos de distribución con transformadores, los supresores de sobretensiones utilizados para proteger a los transformadores pueden proporcionar una protección significativa en contra de los voltajes inducidos.

Los supresores de sobretensiones pueden ser aún más efectivos, para reducir los efectos de los voltajes inducidos, si se utilizan para proteger postes con niveles de aislamientos débiles, los cuales pueden ser: postes con cortacircuitos, postes de remate, postes de transición, siendo económicamente más factible que mejora el nivel de aislamiento de dichos postes.

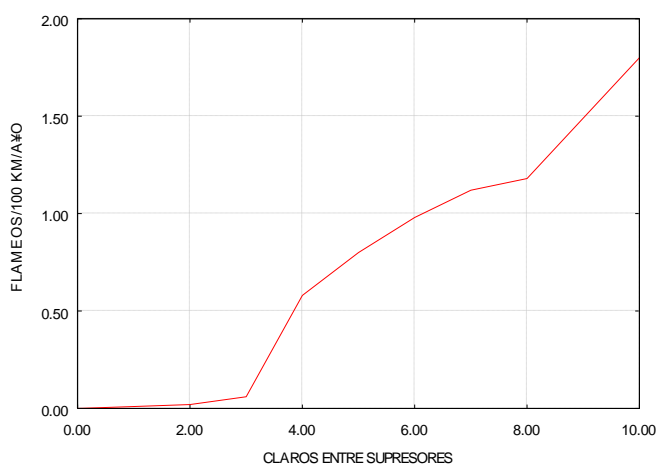


Figura 3. Espaciamiento de los supresores de sobretensiones por flameos debidos a voltajes inducidos [2].

Los resultados obtenidos son para una línea de distribución de 10 m de altura sin hilo de guarda, voltaje crítico de flameo de 150 kV, con una longitud del claro de 75 m y una densidad de rayos a tierra de 1 rayo/km²/año.

VIII. CONSIDERACIONES PARA LA LONGITUD DEL CONDUCTOR BAJANTE A TIERRA DE LOS SUPRESORES DE SOBRETENSIONES

Los conductores bajantes que conectan a la línea de distribución y a las terminales de tierra de los supresores de sobretensiones hacia el equipo que protegen, inherentemente contienen una pequeña inductancia. Esta inductancia puede causar una caída de voltaje $L di/dt$ a través de los bajantes que conducen las corrientes de rayos.

Cualquier caída de voltaje a través del conductor bajante del supresor de sobretensiones se adicionará a la corriente de descarga del supresor de sobretensiones. Esto incrementará el voltaje que aparece a través de los dispositivos protegidos por el supresor de sobretensiones.

El efecto de la longitud del conductor bajante sobre la protección del aislamiento de la línea de distribución no es tan significativo como lo es con la protección del equipo. Para equipo aéreo, el margen de protección generalmente es muy alto. También, el aislamiento de la línea es mucho mayor que el nivel básico de aislamiento al impulso (NBAI) normalizado del equipo. Por supuesto, siempre es buena práctica mantener la conexión de la fase al supresor de sobretensiones y las guías hacia tierra, tan cortas y tan rectas como sea posible.

Si el conductor de fase se localiza en la parte superior del poste es situado de tal forma que intercepte todos los rayos, los supresores de sobretensiones deben ser instalados en el conductor de la fase superior del poste que actuará como hilo de guarda. Una vez que es golpeado, el supresor de sobretensiones de la fase superior conducirá la onda corriente hacia tierra. El circuito estará protegido siempre y cuando la resistencia de puesta a tierra sea lo suficientemente baja y el aislamiento de las fases sin protección sea alto. Como en un hilo de guarda, se debe tener cuidado para mantener un aislamiento alto en las fases sin protección.

IX. PROTECCIÓN DE LA FASE SUPERIOR CON SUPRESORES DE SOBRETENSIONES.

Si un conductor de fase está situado en la parte superior de la línea de distribución interceptará la mayoría de los rayos directos a la línea, por lo que pueden instalarse supresores de sobretensiones en dicha fase, lo cual la hace actuar como si fuera un hilo de guarda. Cuando un rayo incide esta fase, el supresor de sobretensiones instalado, enviará la sobretensión hacia tierra. El circuito estará protegido si la resistencia de conexión a tierra es lo suficientemente baja y el aislamiento de las fases sin proteger es lo suficientemente alto. Las curvas de la Figura 2 se pueden utilizar para estimar la efectividad de la instalación de supresores de sobretensiones en la fase superior de una línea de distribución [2]. Los supresores de sobretensiones deben utilizarse virtualmente en cada poste o estructura para obtener la protección óptima.

X. METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS A PROTEGER CON SUPRESORES DE SOBRETENSIONES EN UNA LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN [3].

Para la selección de las estructuras que se protegerán con supresores de sobretensiones en cada una de las líneas de distribución, se pueden utilizar los siguientes criterios:

a) Análisis de las estadísticas de fallas.

Se requiere hacer un análisis de las estadísticas de fallas de la línea para determinar las estructuras que son más afectadas por las descargas atmosféricas.

Con base en esta información, se puede realizar una primera aproximación para determinar en qué estructuras se instalarán los supresores de sobretensiones. En algunos casos se encontrará que las fallas ocurrieron en

estructuras localizadas en puntos elevados o con resistencias de conexión a tierra elevadas.

Esta información es importante ya que permite hacer una primera selección en la cual se determina en qué estructuras, la experiencia indica, la necesidad de instalar supresores de sobretensiones para evitar interrupciones por flameos.

Generalmente se va a encontrar que las estructuras localizadas en puntos elevados o con valores de resistencia de conexión a tierra altos, son las más afectadas por las descargas atmosféricas.

Normalmente, en las estadísticas de salidas por causa de fallas se puede combinar la información contenida con los registros sobre las cadenas de aisladores que han tenido flameos durante las tormentas eléctricas. Adicionalmente, se conservan también registros de las operaciones del equipo localizador de fallas, el cual proporciona la localización aproximada de la falla, estableciendo la distancia de la torre fallada hasta cada una de las subestaciones a las cuales se conecta dicha línea. En algunos casos, de la información analizada, es posible determinar aún las fases involucradas.

b) Selección de las fases a proteger.

Una vez seleccionadas las estructuras o torres, el siguiente paso es decidir cuáles serán las fases a proteger.

Este aspecto está influenciado en gran parte por el tipo de estructura o torre y por el número de circuitos que tiene. Generalmente, en torres de un solo circuito debe esperarse que las fases que pudieran estar involucradas, en cadenas flameadas por rayos, sean las exteriores, ya que son las más expuestas a las fallas de blindaje. Sin embargo, en estructuras o torres donde la resistencia de conexión a tierra es elevada, la fase central puede también estar expuesta a fallas por flameo inverso, particularmente en torres con ventanas reducidas.

En las líneas de doble circuito, es decir con un circuito a cada lado de la torre en configuración quasi-vertical, es común encontrar que las fases superiores e inferiores sean las más afectadas por las descargas atmosféricas. Este fenómeno se debe, por una parte, a que durante un proceso de flameo inverso, el voltaje en el copete de la torre afecta principalmente a la fase superior, mientras que el efecto de acoplamiento del hilo de guarda al conductor de la fase inferior es reducido por la mayor distancia entre los dos conductores. Esto origina que cualquier sobretensión en el conductor inferior tenga muy poca atenuación por la presencia del hilo de guarda.

En los casos en que se hayan registrado fallas recurrentes en las tres fases, es prudente decidir la instalación de supresores de sobretensiones en las tres fases. En forma similar, si las fallas se concentran en las fases superior e

inferior, será suficiente proporcionar protección sólo a esos conductores.

c) Protección de líneas de doble circuito.

En el caso de las líneas de doble circuito, es importante proteger ambos circuitos, en aquellas estructuras donde las estadísticas de fallas muestren problemas frecuentes.

d) Consideraciones en la protección de estructuras elevadas.

Debe considerarse también la posibilidad de que al proteger algunas estructuras elevadas, parte de la corriente del rayo puede afectar a las estructuras adyacentes y no a las protegidas.

Esto se confirmará con los primeros resultados de la instalación de los supresores de sobretensiones como dispositivos de protección y, en caso necesario, deberán también protegerse esas estructuras, en las mismas fases.

e) Simulaciones con el sistema de protección seleccionado.

Realizar simulaciones analíticas para confirmar que el esquema de protección fue el adecuado.

Esto es conveniente particularmente en el caso de proteger sólo algunos de los conductores en los circuitos. Sin embargo, también es importante para confirmar el efecto de las torres vecinas.

f) Criterios

Si se parte de que el mecanismo de operación de los supresores de sobretensiones con electrodos de descarga es como se ha evaluado y observado en las líneas de distribución, se puede esperar que el valor de la resistencia de conexión a tierra de estos supresores de sobretensiones no afecte su operación, por lo que se recomienda no realizar mejora alguna a la red de tierras en torres protegidas con este tipo de dispositivo, siempre que se protejan todos los conductores en la torre.

g) Determinación de la densidad de rayos a tierra.

Un aspecto importante consiste en determinar la densidad de rayos a tierra de la zona por donde cruza la línea de distribución.

h) Comportamiento de la línea ante las descargas atmosféricas.

Comportamiento característico ante las descargas atmosféricas.

i) Topografía del terreno.

Topografía del terreno por donde pasa la línea de distribución.

j). Estructuras expuestas en áreas elevadas y en pendientes o laderas de terreno montañoso, con escasa vegetación y con claros largos.

Los supresores de sobretensiones se usan más comúnmente en secciones cortas de las líneas, o como en regiones rocosas donde la resistencia de conexión a tierra es muy alta, ya que podría ser más económico instalar supresores de sobretensiones que reducir la resistencia de conexión a tierra. También, se puede considerar la importancia de la línea conectada a cargas críticas en donde la pérdida del servicio se debe de mantener al mínimo a pesar de los costos.

Para proteger totalmente a una línea de distribución se requiere de un gran número de supresores de sobretensiones para proteger a todas las fases y a todas las estructuras de una línea de distribución de gran longitud. Esto implica una enorme inversión económica.

k) Verificación de la reducción de los índices de falla de la línea.

Una vez instalados los supresores de sobretensiones, debe registrarse una reducción notable de los índices de fallas en la línea, con respecto a los mayores niveles históricos registrados de fallas por descargas atmosféricas.

XI. CONCLUSIONES.

- Para líneas de distribución con una altura menor que 15 m y con un espaciamiento entre conductores de 2 m se recomienda un ángulo de blindaje de 45° o menor.. Las líneas con mayor altura requieren ángulos de blindaje menores [3].
- La efectividad del hilo de guarda depende en gran parte del aislamiento proporcionado entre el conductor bajante a tierra y los conductores de fase. Si el bajante a tierra se encuentra en contacto directo con el poste, en toda su longitud, es difícil proporcionar un aislamiento adecuado.
- Para eliminar virtualmente los flameos, se puede utilizar el hilo de guarda y supresores de sobretensiones en cada fase y en cada poste de la línea. Los supresores de sobretensiones protegerán a la línea de los flameos inversos; el hilo de guarda enviará la mayor parte de la corriente hacia tierra y de esta manera los supresores de sobretensiones no estarán expuestos a una alta energía de entrada. Los supresores de sobretensiones permiten que los diseños de las líneas de distribución con hilo de guarda sean menos dependientes del nivel del aislamiento y del aterrizamiento.

- El alto número de flameos puede provocar confusión donde el neutro no está aterrizado, excepto en los postes donde existen supresores de sobretensiones instalados en las tres fases y el nivel de aislamiento del neutro a tierra es alto.
- Los supresores de sobretensiones pueden reducir significativamente los índices de flameos debidos a los voltajes inducidos por rayos cercanos a las líneas de distribución.
- Si un conductor de fase está situado en la parte superior de la línea de distribución interceptará la mayoría de los rayos directos a la línea, por lo que pueden instalarse supresores de sobretensiones en dicha fase, lo cual la hace actuar como si fuera un hilo de guarda [2].
- Los supresores de sobretensiones se usan más comúnmente en secciones cortas de las líneas, o en regiones rocosas donde la resistencia de conexión a tierra es muy alta, ya que podría ser más económico instalar supresores de sobretensiones que mejorar la resistencia de conexión a tierra. También se puede considerar la importancia de la línea conectada a cargas críticas en donde la pérdida del servicio se debe de mantener al mínimo a pesar de los costos.
- Para proteger totalmente a una línea de distribución se requiere de un gran número de supresores de sobretensiones, para proteger a todas las fases y a todas las estructuras de una línea de distribución de gran longitud. Esto implica una enorme inversión económica.

XII. REFERENCIAS

- [1] IEEE Std 1243-1997; “*Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines*”.
- [2] IEEE Std 1410-2010; “*Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines*”.
- [3] De la Rosa C. F., Silva Z. J., Romualdo T. C., Pérez R. H.; “*ESTUDIOS DE CAMPO PARA LA EVALUACION DE DIVERSOS METODOS DE PROTECCION CONTRA SOBRETENSIONES DE ORIGEN ATMOSFERICO EN LINEAS DE DISTRIBUCION*”, Informe Final, proyecto 2617, IIE, Cuernavaca, Mor., Agosto de 1990.
- [4] CFE; “*Normas de Distribución – Construcción – Instalaciones aéreas en media y baja tensión*”.
- [5] http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/1_AcercadeCFE/Estadisticas/Paginas/Transmission-y-distribucion.aspx

XIII. BIOGRAFÍAS DE LOS AUTORES

Carlos Romualdo Torres, realizó estudios de Ingeniería Eléctrica en el Instituto Tecnológico de Oaxaca (1976). Obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en la Sección de Graduados de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional (1981) y el grado

de *Doctor of Philosophy* en *The University of Manchester Institute of Science and Technology* y *The Victoria University of Manchester* (1996), Reino Unido.

Desde 1978, labora en el Instituto de Investigaciones Eléctricas, en la Gerencia de Transmisión y Distribución, donde realiza investigación básica y aplicada en el área de los transitorios electromagnéticos en sistemas eléctricos de potencia, así como en la protección de estructuras de alto riesgo contra tormentas eléctricas.

Antonio Escamilla Paz, Ingeniero eléctrico por el Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. En 2009, obtuvo el grado de Maestro en Ingeniería, con especialidad en Sistemas Eléctricos de Potencia, en la División de Estudios de Posgrado de la Universidad Nacional Autónoma de México. Desde 1999, es investigador de la Gerencia de Transmisión y Distribución del Instituto de Investigaciones Eléctricas. Sus áreas de interés son el análisis y el diseño de sistemas eléctricos y sistemas de protección contra descargas atmosféricas.