



Incab

CÁLCULO DE OPGW PARA CARGAS ELÉCTRICAS EXTREMAS

Ing. Daniel Hidalgo Quesada, MBA
Ingeniero Eléctrico

Sobre el presentador

Daniel Hidalgo



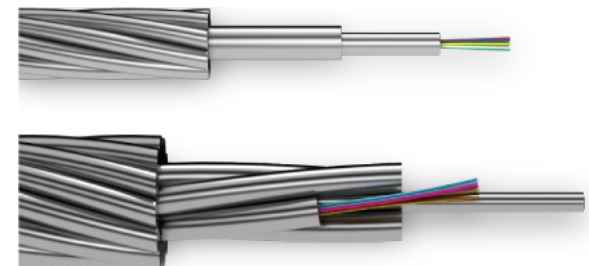
Como ingeniero: estudios de coordinación de aislamiento, estudios de sistemas de potencia en general, estudios de desempeño de líneas de transmisión ante descargas atmosféricas (software TFLASH de EPRI, fenómeno Backflashover, impactos directos de descargas atmosféricas en conductores de fase, ubicación de cables de tierra en líneas aéreas, descargadores de sobretensiones, puesta a tierra, resistencia del OPGW a la carga eléctrica transferida por descargas atmosféricas), especificación de equipos de línea de transmisión [NGLA, EGLA, aisladores poliméricos (suspensión/tensión y poste de línea), aisladores de vidrio, OPGW], estudios de cortocircuito, estudios de estabilidad transitoria, etc. Encargado de Transferencia de Tecnología EPRI en el ICE.

Como analista financiero: análisis de estados financieros, finanzas corporativas, estrategia de finanzas corporativas, análisis de quiebras, problemas financieros, entre otros.

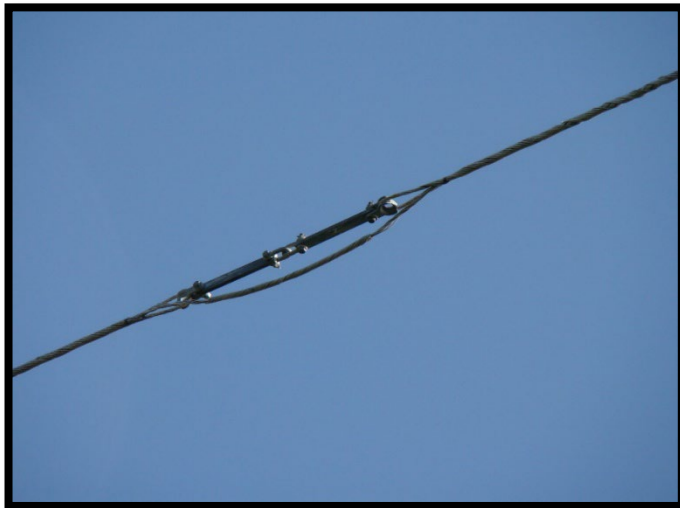
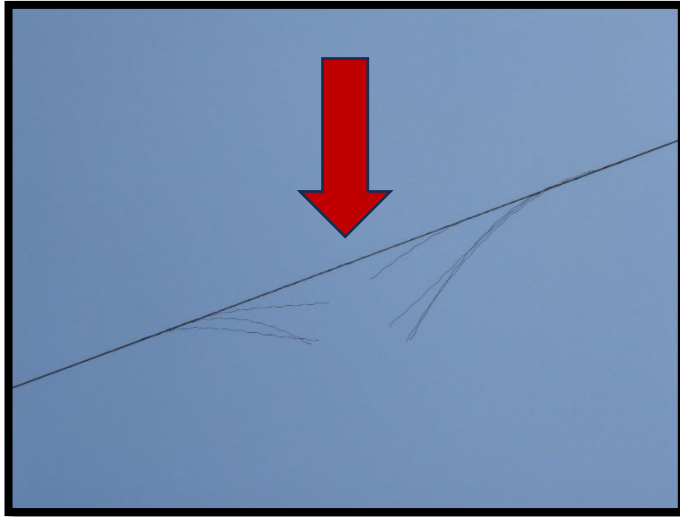
Planteamiento del Problema

En Costa Rica se ha optado por utilizar cables de guarda con fibras ópticas (o cables OPGW, por sus siglas en inglés) en líneas de transmisión aéreas, no solo para proteger a las fases energizadas del impacto directo de descargas atmosféricas descendentes (DAD), sino, especialmente para trasegar las comunicaciones de las redes eléctricas para el despacho de energía.

Sin embargo, la implementación de esta tecnología no ha sido del todo fácil, ya que, el desempeño de algunos de los cables OPGW instalados en las LT aéreas a 138 kV y 230 kV no ha sido del todo satisfactorio...



Planteamiento del Problema



MARCO TEÓRICO

Según las referencias de esta investigación:



Según (Heidler et al., 2008, s. p.), la carga eléctrica transferida por una descarga atmosférica es el parámetro de la corriente de la descarga atmosférica que se asocia con efectos de derretimiento o fundición, mientras que la integral de acción o energía específica es el parámetro responsable de la producción de fuerzas mecánicas y efectos de calentamiento.



Según (Chisholm et al., 2001, s. p.), la carga eléctrica total transferida por la descarga atmosférica en el punto de impacto, Q , más que la integral de acción o energía específica, es el parámetro de su corriente eléctrica que es proporcional a la severidad del calentamiento de las capas metálicas de la estructura impactada.



El parámetro Q de la descarga atmosférica, sea esta de polaridad positiva o negativa, es igual a la integral de la forma de onda de su corriente eléctrica respecto al tiempo (área bajo la curva, se mide en A.s o C). Este es un parámetro completamente variable.



Según (Cooray, 2015), la energía calórica, W , que es transferida al metal por el impacto de una descarga atmosférica es calculada por la siguiente ecuación: $W = Q \cdot V_c$, donde V_c es la caída de tensión en la interfaz arco – metal y es prácticamente una constante.



Según (Cooray, 2015), V_c tiene valores entre 15 a 20 V para el caso en que la superficie metálica impactada sea un cátodo, este escenario solo ocurriría en el caso de que dicha superficie sea impactada por una descarga atmosférica descendente de polaridad positiva.



Según (Mikimasa et al., 2013, s. p.), en el caso de que el impacto se de en un cable OPGW, el valor de esta caída de tensión dependerá de material del que este hecho el cable OPGW, del gas que rodea a dicho cable y dependerá de la polaridad de la descarga atmosférica que realiza el impacto.

MARCO TEÓRICO

Según (Chowdhuri et al., 2005, s. p.):

La probabilidad de que la carga eléctrica total transferida por una descarga atmosférica descendente de polaridad negativa, exceda un valor Q_- , se calcula de la siguiente manera:

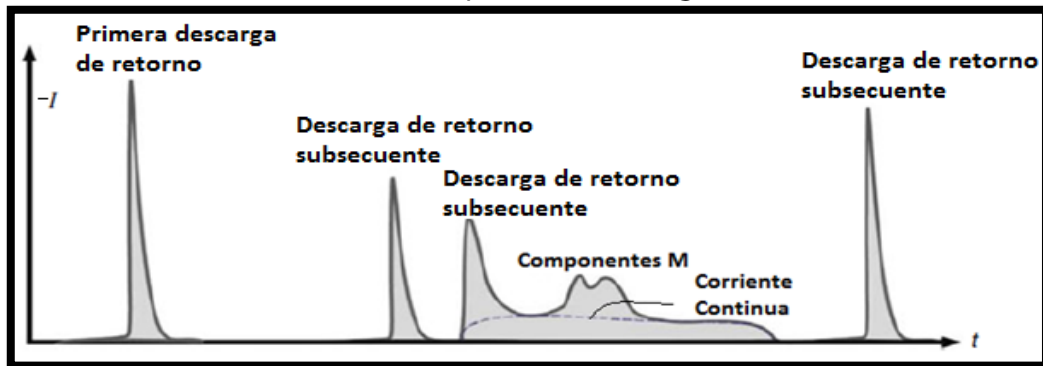
$$P_c(> Q_-) = \frac{1}{1 + \left(\frac{Q_-}{7}\right)^{1.7}}$$

La probabilidad de que la carga eléctrica total transferida por una descarga atmosférica descendente de polaridad positiva, exceda un valor Q_+ , se calcula de la siguiente manera:

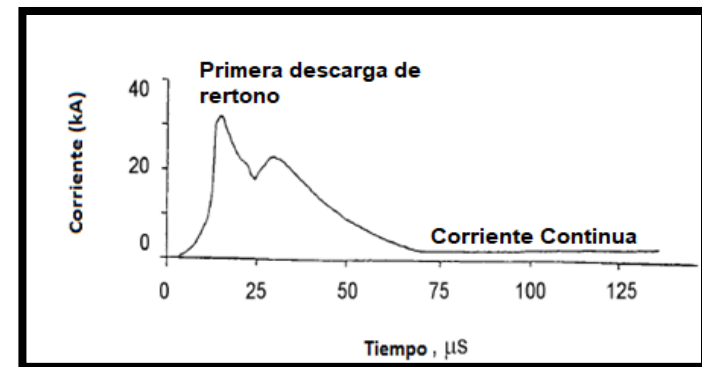
$$P_c(> Q_+) = \frac{1}{1 + \left(\frac{Q_+}{85}\right)^2}$$

$$\int_0^t i dt$$

Forma de onda típica de una descarga atmosférica descendente de polaridad negativa



Forma de onda típica de una descarga atmosférica descendente de polaridad positiva



MARCO TEÓRICO

La norma *IEC 60794-1-24:2014* propone un método de ensayo, el método H2.

	Clase 0	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Corriente (A)	100	200	300	400
Duración (s)	0,5	0,5	0,5	0,5
Transferencia de carga (C)	50	100	150	200

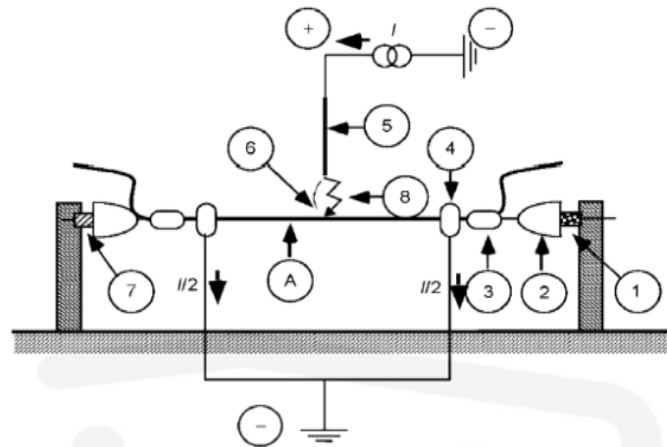
Cualquier incremento, temporal o permanente, de la resistencia óptica, mayor que el valor especificado en el cable C...

Además, si uno o varios de los hilos conductores se vuelven inservibles (ruptura), se deberá verificar que los hilos que permanezcan sanos, la resistencia residual calculada de...

Si la resistencia residual calculada de los hilos que permanezcan sanos es el 75% de la RTS, originalmente de la muestra de prueba, se...

Después de la prueba, se deberá determinar la clase de PGW, a saber: Clase 0, Clase 1 o Clase 3.

Se deberá determinar la clase de PGW, a saber, 50 C, 100 C o 200 C.



Leyenda

- 1 Termopar
- 2 Aislador
- 3 Fijaciones de amarre
- 4 Conectores a tierra simétricos
- 5 Electrodo con superficie plana preferiblemente Wolframio-Cobre
- 6 Fusible metálico para ignición
- 7 Medidor de tensión
- 8 Distancia entre electrodo y superficie del cable = 6 cm
- A Muestra de ensayo

MODELO DE INGENIERÍA E IMPLEMENTACIÓN

En la región chorotega de Costa Rica, zona de alta incidencia de descargas atmosféricas descendentes, se encuentra una línea de transmisión a 230 kV de 1 circuito trifásico y un HG. La silueta de torre típica es la siguiente:

Desde el año 2012 hasta el 2016, el área de mantenimiento LT del ICE encontró **8 daños** en el cable OPGW de 12.6 mm de diámetro, el cual, se encuentra instalado en LT a 230 kV, lo que da un promedio de 1.6 daños/año. El daño reportado fue el rompimiento de hilos de la capa externa del cable OPGW.

El cable se compone de la siguiente manera: un tubo central que contiene la unidad óptica con 24 fibras y una corona exterior de 8 hilos, siendo esta constituida con 4 hilos de aluminio con un diámetro de 3.4 mm y con 4 hilos de acero recubiertos de aluminio con un diámetro de 3.4 mm.

Este cable OPGW tiene una resistencia a la descarga atmosférica de **100 Coulombs (C)** [Clase 1 según IEC 60794-1-24:2014].



MODELO DE INGENIERÍA E IMPLEMENTACIÓN

$$P_c(> Q_-) = \frac{1}{1 + \left(\frac{Q_-}{7}\right)^{1.7}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{100}{7}\right)^{1.7}} = 0.01076383 = 1.08\%$$

$$P_c(> Q_+) = \frac{1}{1 + \left(\frac{Q_+}{85}\right)^2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{100}{85}\right)^2} = 0.4194485 = 41.94\%$$

MODELO DE INGENIERÍA E IMPLEMENTACIÓN

Según datos de la Red de Detección de Descargas Atmosféricas en Costa Rica cuyo fabricante es la empresa VAISALA.

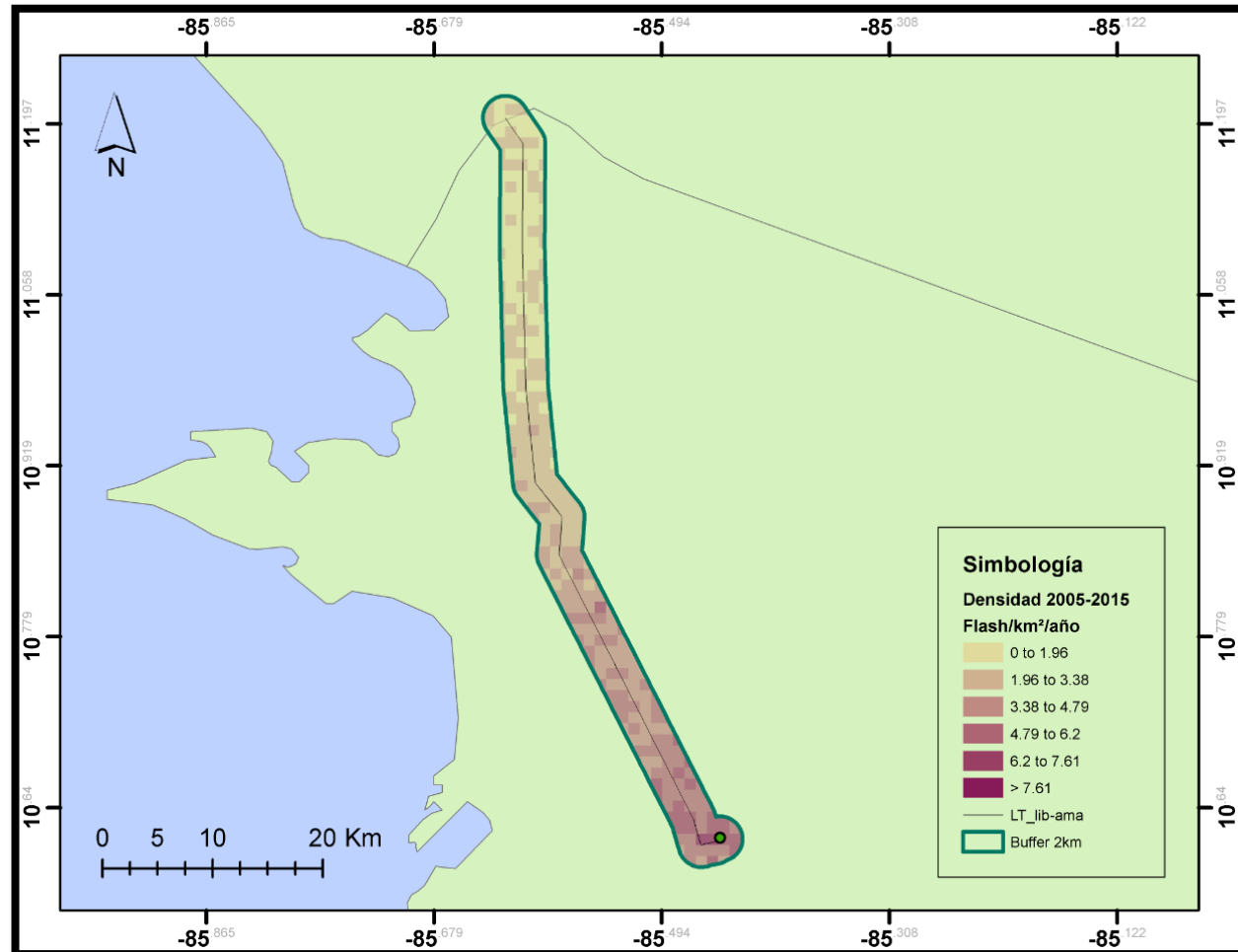
Densidad promedio a tierra:
3.49 flashes/km²/año.

Mínima esperable: 1.46
flashes/km²/año.

Máxima esperable: 6.38
flashes/km²/año.

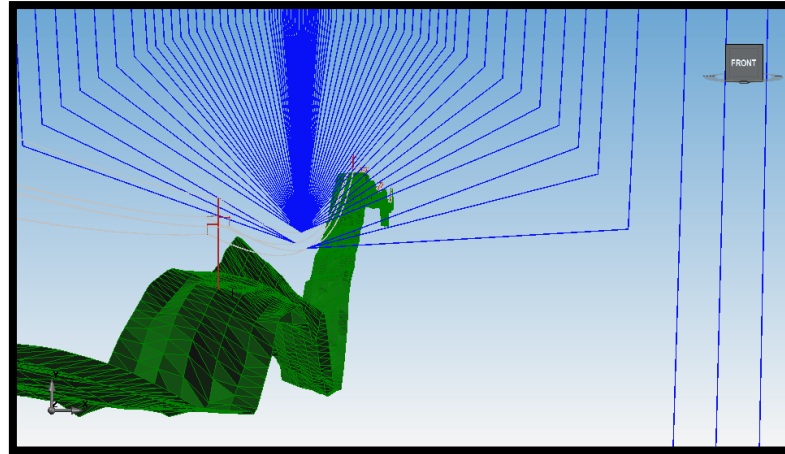
Negativas : 81.4%.

Positivas: 18.6%.



MODELO DE INGENIERÍA E IMPLEMENTACIÓN

Con la información mostrada anteriormente y utilizando el modelo de esta LT a 230 kV construido en el software TFLASH del Electric Power Research Institute (EPRI), se obtiene lo siguiente:



270 impactos **en 5 años** en el cable OPGW
→ densidad promedio flashes $\therefore \text{km}^2 \therefore \text{año}$

Periodo entre
2012 y 2016

115 impactos **en 5 años** en el cable OPGW
→ densidad mínima flashes $\therefore \text{km}^2 \therefore \text{año}$

495 impactos **en 5 años** en el cable OPGW
→ densidad máxima flashes $\therefore \text{km}^2 \therefore \text{año}$

MODELO DE INGENIERÍA E IMPLEMENTACIÓN

Considerando una tasa de ocurrencia del **18.6 %** para descargas atmosféricas descendentes de polaridad positiva (DADPP) en la zona de influencia de la LT a 230 kV, se tiene lo siguiente:

Periodo entre
2012 y 2016

50 impactos **de DADPP en 5 años** en el cable OPGW
→ densidad promedio flashes $\therefore \text{km}^2 \therefore \text{año}$

21 impactos **de DADPP en 5 años** en el cable OPGW
→ densidad mínima flashes $\therefore \text{km}^2 \therefore \text{año}$

92 impactos **de DADPP en 5 años** en el cable OPGW
→ densidad máxima flashes $\therefore \text{km}^2 \therefore \text{año}$

Entre el año 2012 y 2016

15.9% de las **50** DADPP que impactan al cable OPGW
→ densidad promedio flashes $\therefore \text{km}^2 \therefore \text{año}$

37.8% de las **21** DADPP que impactan al cable OPGW
→ densidad mínima flashes $\therefore \text{km}^2 \therefore \text{año}$

8.7% de las **92** DADPP que impactan al cable OPGW
→ densidad mínima flashes $\therefore \text{km}^2 \therefore \text{año}$

$$P_c(> Q_+) = \frac{1}{1 + \left(\frac{Q_+}{85}\right)^2}$$

$$Q_+ = 85 \left[\frac{1 - P_c(> Q_+)}{P_c(> Q_+)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

MODELO DE INGENIERÍA E IMPLEMENTACIÓN

$8 \text{ DADPP} > +195 \text{ C} \rightarrow$ número promedio de impactos

$8 \text{ DADPP} > +109 \text{ C} \rightarrow$ número mínimo de impactos

$8 \text{ DADPP} > +275 \text{ C} \rightarrow$ número máximo de impactos

El escenario en donde se modela la cantidad mínima de impactos esperables en el OPGW es el que explica más fielmente la realidad, el error del modelo es del 9% (predice que la resistencia del OPGW es de 109 C, cuando el fabricante declara 100 C).

RESULTADO E IMPACTO

Con los resultados obtenidos podríamos afirmar lo siguiente: los **8 daños** presentes en el cable OPGW instalado en la LT a 230 kV representan a una población de 8 descargas atmosféricas descendentes de polaridad positiva que impactaron al cable y lo dañaron dentro de una población general de aproximadamente 21 especímenes para el periodo entre los años 2012 a 2016.

Caso	Probabilidad general de que se dé el impacto de una DADPP en el cable OPGW Pirelli instalado en la LT a 230 kV para el periodo 2012 - 2016 y que a su vez se dé un daño por fundición asociado
Mínima densidad de descargas atmosféricas esperable	7.04%

Este nivel de riesgo **es intolerable.**

$$37.8\% * 18.6\% \cong 7.04\%$$

37.8%: Probabilidad de que ocurran 8 descargas atmosféricas descendentes de polaridad positiva potencialmente dañinas (> 100 C) en una población 21 especímenes.

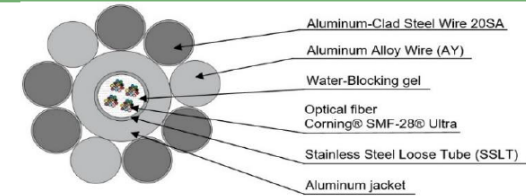
18.6%: Tasa de ocurrencia de descargas atmosféricas descendentes de polaridad positiva en la zona de influencia de la LT.

RESULTADO E IMPACTO

Aplicando la misma metodología de cálculo, si la resistencia del cable OPGW fuese de 200 C, la probabilidad de ruptura de los hilos de la corona externa del cable OPGW **bajaría del 7% a un rango de entre 2.2 - 2.7 %**, lo que aumentaría la confiabilidad del cable OPGW en esta línea de transmisión.



Design



Design element	Material	Count	Diameter	
			Metric (mm)	Customary (inches)
Center member	AC-SST	1	7.50	0.2953
1st stranded layer	20% ACS wire/AY-wire	6/3	3.75	0.1476

InSky OPGW CA 48U 15.0mm 123kA2-s 90kN

Electrical	Metric	Customary
DC resistance at 20°C (68°F)	0.374 Ω/km	0.6012 Ω/mile
DC resistance at 25°C (77°F)	0.380 Ω/km	0.6117 Ω/mile
Short current circuit capacity	123.1 kA ² ·s	-
Basis: Initial cable temp = 40°C (104°F), Final = 210°C (410°F), Duration = 0,1 s		
Short current circuit for 0,1 sec	35.1 kA	-
Rac/Rdc ratio	1.012	-
AC resistance at 25°C (77°F)	0.3845 Ω/km	0.6187 Ω/mile
AC resistance at 50°C (122°F)	0.4175 Ω/km	0.6719 Ω/mile
AC resistance at 75°C (167°F)	0.4506 Ω/km	0.7251 Ω/mile
Geometric Mean Radius (GMR)	2.5100 mm	0.0082 ft
Inductive Reactance (Xa) @ 60 Hz	0.3619 Ω/km	0.5824 Ω/mile
Capacitive Reactance (X'a) @ 60 Hz	0.1768 MΩ·km	0.1099 MΩ·mile
Lightning resistance	200 Coulomb	

RESULTADO E IMPACTO

Esta metodología de cálculo requiere de muchos datos provenientes de muchas fuentes de información.

- Se requiere tener una red de detección de descargas atmosféricas: Costa Rica tiene una del fabricante VAISALA para determinar las densidades de impacto de descargas atmosféricas en las zonas de influencia de las LT.
- Se requiere tener modelos electromecánicos de las LT y topografía LiDAR para construir modelos de análisis de la LT en PLS CADD y en TFLASH.

¿Qué pasa si no tengo toda esta tecnología?

R/ se debe acudir a modelos aproximados.

¿Cómo estimar la máxima carga eléctrica a la que se expone un cable OPGW de forma aproximada una vez este esté instalado sobre una LT?

Ejercicio que se basa en el mostrado en (Chisholm et al., 2001, s. p.)

Información:

Se tiene una línea de transmisión de doble circuito:

- Con torres de 45 m de altura.
- Con 2 hilos de guarda, uno de ellos un cable OPGW. Distancia entre HG de 2.6 m.
- La LT atraviesa una zona en los Estados Unidos de Norte América con una densidad de 4 flashes/km²/año.

¿Cómo estimar la máxima carga eléctrica a la que se expone un cable OPGW de forma aproximada una vez este esté instalado sobre una LT?

Ejercicio que se basa en el mostrado en (Chisholm et al., 2001, s. p.)

$$N = N_g \left(\frac{28h_t^{0.6} + b}{10} \right)$$

Dónde:

- N Incidencia del número de descargas atmosféricas que impactan a los hilos de guarda en una línea de transmisión en flashes/100km/año.
- N_g Densidad de descargas atmosféricas en flashes/km²/año.
- h_t Altura del o los hilos de guarda en la torre.
- b Distancia o separación entre hilos de guarda.

$$N = N_g \left(\frac{28h_t^{0.6} + b}{10} \right) = 4 * \left(\frac{28 * 45^{0.6} + b}{10} \right)$$

$$N \approx 110 \text{ flashes/año/100km}$$

$$OPGW \rightarrow 55 \text{ flashes/año/100km}$$

$$5 \text{ (años)} * 55 \text{ (flashes } \therefore \text{ año } \therefore \text{ 100km)} = 275 \text{ (flashes } \therefore \text{ 100km)}$$

¿Cómo estimar la máxima carga eléctrica a la que se expone un cable OPGW de forma aproximada una vez este esté instalado sobre una LT?

Ejercicio que se basa en el mostrado en (Chisholm et al., 2001, s. p.)

**Descargas
atmosféricas a tierra:**

**98%: polaridad
negativa**

2%: polaridad positiva

$$OPGW \rightarrow 275 \frac{\text{flashes}}{100\text{km}} * 0.02 \approx 6 \frac{\text{flashes positivos}}{100\text{km}}$$

De entre 6 flashes positivos / 100 km, 1 será el que transfiera la máxima carga al punto de impacto, es decir, la probabilidad de que se dé la máxima transferencia de carga será igual a:

$$P = \frac{1}{6} = 0.167 = 16.7\%$$

¿Cómo estimar la máxima carga eléctrica a la que se expone un cable OPGW de forma aproximada una vez este esté instalado sobre una LT?

Ejercicio que se basa en el mostrado en (Chisholm et al., 2001, s. p.)

$$P = \begin{cases} 16.7\% \text{ máxima transferencia de carga} + \\ 83.3\% \text{ transferencia de carga} + \text{ menor al máximo} \end{cases}$$

Si aplicamos la distribución de probabilidad propuesta por (Chowdhuri et al., 2005, s. p.):

$$P_c(> Q_+) = \frac{1}{1 + \left(\frac{Q_+}{85}\right)^2}$$

$$Q_+ = 85 \left[\frac{1 - P_c(> Q_+)}{P_c(> Q_+)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Q_+ = 85 \left[\frac{1 - 0.167}{0.167} \right]^{\frac{1}{2}} \approx +190 \text{ C}$$

$$P = \begin{cases} 16.7\% \text{ transferirán } \textit{más de 190 C} \\ 83.3\% \text{ transferirán } \textit{menos de 190 C} \end{cases}$$

¿Cómo estimar la máxima carga eléctrica a la que se expone un cable OPGW de forma aproximada una vez este esté instalado sobre una LT?

Ejercicio que se basa en el mostrado en (Chisholm et al., 2001, s. p.)

Premisas de los resultados:

- Para esta aplicación, con un nivel de riesgo del 16.7%, se podría especificar un cable OPGW que tenga una resistencia a la descarga atmosférica de 190 C. Con esto se podría asegurar que para el 83.3% de los casos, el cable OPGW podría resistir el impacto de una descarga atmosférica descendente de polaridad positiva.
- Si el cable se especifica para la clase 3, según la norma IEC 60794-1-24:2014, es decir, con una resistencia a la descarga atmosférica de 200 C, por las ecuaciones de Chowdhuri se podría esperar que, solo en el 15.3% de los casos, una descarga atmosférica descendente de polaridad positiva podría exceder ese nivel de carga.
- Finalmente, dada esa información, se podría calcular que, la probabilidad de que coincidan 2 eventos, a saber: que se dé una descarga atmosférica descendente a tierra de polaridad positiva (2%) y que esta supere los 200 C (15.3%) de transferencia de carga, es del 0.31% ($2\% * 15.3\% = 0.31\%$). Es decir, para este caso, es prácticamente imposible que una descarga atmosférica a tierra de polaridad positiva exceda la resistencia a la descarga atmosférica del cable (200 C).



Conclusiones

- Se determinó la relación existente entre la carga eléctrica transferida por la DADPP y los daños presentes en cables de guarda con fibras ópticas.
- Se identificó la normativa internacional que propone un método de ensayo para determinar la clase de descarga atmosférica de los cables OPGW.
- Se planteó una metodología analítica útil para el cálculo de la probabilidad de daño por impacto directo de DADPP sobre cables OPGW.

Referencias

- F. Heidler, W. Zischank, Z. Flisowski, C. Bouquegneau y C. Mazzeti, «Parameters of Lightning Current Given in IEC 62305 - Background, Experience and Outlook,» de *29th International Conference on Lightning Protection*, Uppsala, Sweden, 2008.
- International Electrotechnical Commission, IEC 60794-1-24: Cables de Fibra Óptica Parte 1 - 24: Especificación genérica - Procedimientos de Ensayo para Cables Ópticos Básicos- Métodos de Ensayo Eléctricos, Génova, Suiza: Publicaciones IEC, 2014.
- M. Iwata, T. Ohtaka, Y. Kuzuma y Y. Goda, «Development of a Method of Calculating the Melting Characteristics of OPGW Strands Due to DC Arc Simulating Lightning Strike,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, nº 3, pp. 1314 - 1321, 2013.
- V. Cooray, *An Introduction to Lightning*, Dordrecht: Springer, 2015.
- W. A. Chisholm, J. P. Levine y P. Chowdhuri, «Lightning Arc Damage to Optical Fiber Ground Wires (OPGW): Parameters and Test Methods,» de *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2001*, Vancouver, BC, Canada, 2001.



Incab

Thank you

[INCABAMERICA.COM](https://www.incabamerica.com)