



## APLICACIONES INDUSTRIALES

# Alternativas para disminuir las interrupciones del servicio eléctrico por descargas atmosféricas en Barquisimeto

Carmen Luisa Vásquez  
Olga Susana Suárez  
María Carolina Blanco

Recibido: Febrero del 2004

Aprobado: Abril del 2004

## Resumen / Abstract

El sistema de distribución de energía eléctrica de las ciudades de Barquisimeto y Cabudare está constituido por redes aéreas de nivel de tensión de operación de 24 kV. Buscando alternativas para disminuir las interrupciones por impactos directos y cercanos de las descargas atmosféricas se realiza un estudio técnico-económico para proponer una serie de recomendaciones para disminuirlas. Las alternativas analizadas son: el sobreaislamiento, el cable de guarda o el uso de descargadores de sobretensiones distribuidos, en las recomendaciones establecidas en la norma IEEE 1410-1997. Se determina para cada circuito de distribución la alternativa técnico-económica más adecuada.

Palabras clave: interrupciones, esquemas de protección, rayos

*The electrical power distribution system of the Barquisimeto and Cabudares cities is constituted by overhead network of 24 kV operation voltage level. The alternatives for diminishing the lightning outages by direct and indirect strokes are found. An economic-technique study for proposing recommendations for diminishing it is carried out. The analyzed alternatives are: the improvements insulation, the shield or the use of distributed overvoltage discharges, under the established recommendations in the IEEE 1410-1997 standard. For each distribution circuit the economic-technique alternative more available is determined.*

*Key words: interruptions, protection schemes, lightning*

## INTRODUCCIÓN

La República Bolivariana de Venezuela es uno de los principales países productores de energía eléctrica a nivel mundial, la cual es transmitida y comercializada a Brasil y Colombia. Más del 95 % del territorio nacional se encuentra electrificado, siendo uno de los países con mayor consumo de energía por habitante.

Uno de los principales fenómenos ambientales a los cuales se ve sometida Venezuela, como país tropical, son las tormentas eléctricas. Estas descargas atmosféricas son fuentes de fallas y sobretensiones en los sistemas eléctricos de

potencia de tensiones de operación inferiores a los 245 kV. Desde la construcción de las primeras líneas de transmisión, su efecto se ha visto evidenciado al incrementar las interrupciones del servicio eléctrico. Muchos estudios se han realizado a nivel mundial para tratar de disminuirlas, pero la mayoría han sido enfocados a líneas y subestaciones de transmisión, a pesar de ser las líneas de distribución las que se ven sometidas mayormente a su efecto, por causa de su relativo bajo nivel de aislamiento.

Las regulaciones impuestas al sector eléctrico en la nueva Ley del Servicio Eléctrico<sup>1</sup> y las Normas de Calidad del Servicio de Distribución de Electricidad<sup>2</sup>

exigen penalizar, próximamente, por las interrupciones del servicio a las empresas encargadas de distribuir la energía eléctrica, lo que incrementa sus pérdidas, obligándolas a buscar soluciones técnico-científicas que permitan minimizar sus causas. La solución de problemas como este reviste singular importancia para el sector eléctrico, urgido de un perfeccionamiento de sus sistemas de gestión, que le permitan cumplir con los compromisos futuros que conlleva el desarrollo industrial creciente del país.

El sistema de distribución de energía eléctrica de la ciudad de Barquisimeto está constituido por líneas aéreas de 24 kV, las cuales abastecen una potencia de 350 MW correspondiente al 3,8 % de los consumidores de Venezuela. La compañía encargada de distribuir y comercializar la energía eléctrica en esta ciudad, en los últimos años, ha registrado un incremento en su número de interrupciones por causa de las descargas atmosféricas, lo que ha originado un incremento en los costos de operación y mantenimiento del sistema. Todo ello ha motivado que la empresa haya orientado sus esfuerzos en la búsqueda de soluciones técnico-científicas que permitan minimizar las interrupciones, implementando sistemas de protección contra sobretensiones confiables.

El presente artículo contiene los resultados obtenidos y las alternativas de solución recomendadas, producto de la simulación de técnicas de protección contra descargas atmosféricas en las líneas de distribución de energía eléctrica de la ciudad.

## ANÁLISIS DE LA ESTADÍSTICA DE FALLA

La empresa de energía eléctrica de la ciudad de Barquisimeto lleva un registro diario de las interrupciones de servicio eléctrico, especificando los siguientes datos: interruptor y subestación que despeja la falla, tiempo de ocurrencia, duración y causa.<sup>3</sup> Las causas que ocasionan las interrupciones se clasifican en: conocidas (programadas, animales, ramas de árboles, accidentes ocasionados por terceros y otros) y desconocidas. Para lograr identificar cuáles de estas fallas reportadas como desconocidas se originan por descargas atmosféricas se utiliza el método heurístico, cuyas bases se describen a continuación:

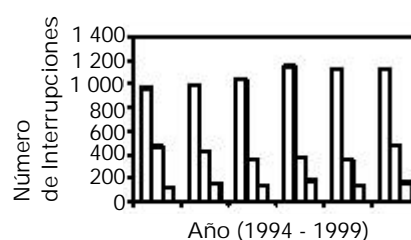
1. Análisis del Reporte de interrupciones del Servicio Eléctrico de ENELBAR Región I, para los últimos seis años.

2. Obtención de los datos de la fecha y hora de ocurrencia de los Reportes de interrupciones de los eventos clasificados por causa desconocida.

3. Obtención de los datos de la presencia de las descargas atmosféricas de los Reportes climatológicos en las fechas y horas de ocurrencia.<sup>4</sup>

4. Determinación del número total de fallas desconocidas que ocurrieron en presencia de las descargas atmosféricas, comparando para par los datos obtenidos.

Una síntesis de los resultados obtenidos se muestra en la figura 1.



Interrupciones registradas por la empresa ENELBAR.

1

## DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

La metodología fue desarrollada sobre la base de las recomendaciones presentes en la norma *IEEE 410-1997*,<sup>5</sup> con algunas modificaciones en función del conocimiento actual existente.<sup>6-8</sup> La estructura de la metodología es la siguiente:

1. Evaluación de la necesidad de la protección.

- Criterio del comportamiento.
- Cálculo de la densidad de rayos a tierra.
- Cálculo del índice de falla por impactos directos.
- Cálculo del índice de falla por impactos cercanos.
- Cálculo del índice total de la línea no protegida.
- Comparación del índice de falla con el criterio de comportamiento.

2. Evaluación de las alternativas de protección.

- Evaluación de la protección por sobreaislamiento.
  - Verificación del nivel mínimo de aislamiento por clase de tensión.
  - Verificación del nivel mínimo de aislamiento por contaminación atmosférica.
  - Verificación del nivel máximo de aislamiento en función de las dimensiones del aislador y las distancias mínimas recomendadas.
  - Cálculo del índice de falla de la línea con sobreaislamiento.
  - Comparación del índice de falla de la línea con el criterio de comportamiento.

b) Evaluación de la protección por cable de guarda con puesta a tierra cada 8, 5, 4, 3, 2 y en todas las estructuras.

- Cálculo del índice de falla por impactos directos al cable de guarda o a las estructuras (descarga retroactiva).
- Cálculo del índice de falla por impactos directos al conductor de fase (fallas de apantallamiento).
- Cálculo del índice de falla por impactos cercanos.
- Comparación del índice de falla de la línea con el criterio de comportamiento.

c) Evaluación de la protección con pararrayos.

- Selección del pararrayos.
- Para estructuras horizontales con frecuencia de instalación cada 5, 4, 3, 2 y en todas las estructuras.

1. Cálculo de la probabilidad de falla del pararrayo.  
2. Cálculo del índice de falla por impactos directos en estructuras protegidas.

3. Cálculo del índice de falla por impactos directos a la mitad de la distancia entre estructuras protegidas.

4. Cálculo del índice de falla por impactos cercanos.

- Para estructuras triangulares, pararrayos ubicados en la fase superior, en todas las estructuras.

1. Cálculo de la probabilidad de falla del pararrayo.

2. Cálculo del índice de falla por impactos directos en estructuras protegidas.

3. Cálculo del índice de falla por impactos directos a la mitad de la distancia entre estructuras protegidas.

4. Cálculo del índice de falla por impactos cercanos.

5. Cálculo del índice de falla por impacto directo a los conductores de fase sin pararrayos instalados.

- Cálculo del índice de falla total de la línea protegida con pararrayos.

- Comparación del índice de falla con el criterio de comportamiento.

d) Análisis técnico-económico de las variantes. Selección de la alternativa más adecuada.

- Análisis por el método beneficio/costo de las variantes desde el punto de vista técnico.

- Selección de la variante de mayor relación beneficio/costo.

3. Planteamiento de los resultados.

## RESULTADOS

Se determinan los índices de falla de las líneas no protegidas y protegidas con sobreaislamiento, cable de guarda y descargadores de sobretensiones distribuidos, la relación beneficio/costo y la alternativa más adecuada para cada uno de los circuitos de distribución.

Los resultados obtenidos permiten los siguientes análisis:

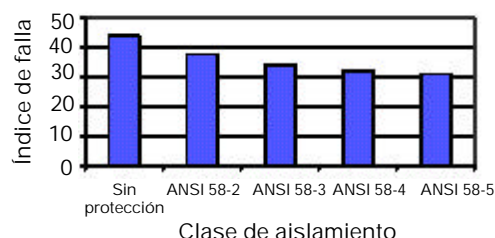
### Protección con sobreaislamiento

El sobreaislamiento de una línea tiene el efecto de reducción del índice de falla. En este estudio se muestra que en ninguno de los circuitos analizados resultó ser este medio de protección la alternativa seleccionada.

Las líneas de 24 kV están actualmente sobreaisladas (aisladores ANSI 56-1, ANSI 56-2):<sup>9</sup> en las que tienen instaladas ANSI 56-1 se realiza el estudio con aisladores clase ANSI 56-5, 56- 4 y 56-3, en forma general, reducen el índice de falla total en un 86,5 %, 78 %, 72 %. Desde el punto de vista de reducción del índice de falla por impactos cercanos se observan reducciones del 60 %, 34 % y 20,8 %.

En las que tienen instaladas ANSI 56-2 se realiza el estudio con aisladores clase ANSI 56-3, 56- 4 y 56-5, en forma general, se reduce el índice de falla en 90 %, 84 %, 82 % respectivamente. Desde el punto de vista de reducción del índice de falla por impactos cercanos se observan reducciones de 56,6 %, 30 % y 18 %.

Como se observa en la figura 2 el sobreaislamiento de una línea tiene un mayor efecto en la reducción del índice de falla debido a impactos cercanos.



Índice de falla del circuito cemento para varios niveles de aislamiento.

2

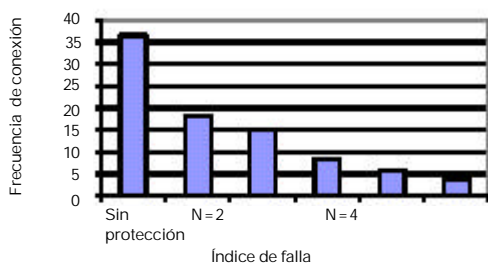
### Protección con cable de guarda

El uso de cable de guarda es una alternativa factible para la reducción del índice de falla en líneas de distribución de energía eléctrica para resistencias de puesta a tierra inferior a 15  $\Omega$ . Para resistencia de puesta a tierra de 50  $\Omega$  y frecuencia de conexión a tierra superior a cada 3 estructuras no es una alternativa factible ya que el índice de falla de la línea protegida es superior al de la línea sin protección. Este efecto se debe a que al aumentar la altura de la línea, cuando se instala dicho medio de protección, se

incrementa en la misma manera el número de impactos a la línea y si la resistencia de puesta a tierra es muy elevada existe una alta probabilidad que dichos impactos produzcan descargas retroactivas.

En tal sentido, el efecto de la conexión a tierra es muy importante. Para resistencia de puesta a tierra de 10  $\Omega$  el índice de falla se reduce en un 12 %, aproximadamente, del valor correspondiente de la misma línea sin protección. Con los valores de 15  $\Omega$  la reducción es de aproximadamente el 16 %.

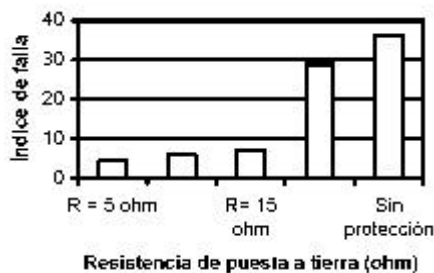
La figura 3 muestra el efecto que introduce el valor de la resistencia de puesta a tierra en el índice de falla del circuito Iribarren. La frecuencia de conexión a tierra del cable de guarda también influye notablemente en los índices de fallas de la línea protegida. Todas las líneas presentan índices de fallas inferior a 6 fallas/ 100 km/ año para el caso de frecuencia de instalación cada 2 estructuras.



Efecto de la frecuencia de conexión a tierra del cable de guarda en el circuito Iribarren.

3

La figura 4 muestra el efecto de la frecuencia de conexión a tierra del cable de guarda en el circuito Iribarren.



Efecto de la resistencia de puesta a tierra del cable de guarda en el circuito Iribarren.

4

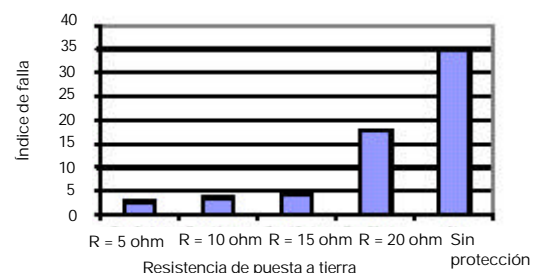
### Protección con pararrayos

Para las líneas de 24 kV analizadas el uso de pararrayos de óxido de zinc es la alternativa de protección que presentó ser la más conveniente. El efecto de la conexión a tierra es importante. Por

ejemplo, una resistencia de puesta a tierra de 10 el índice de falla se reduce en un 9 %, aproximadamente, del valor correspondiente de la sin protección. Con los valores de 15 la reducción es de aproximadamente 10 %. Con resistencias de 50. El efecto del uso de este tipo de dispositivos es muy similar al de la línea no protegida. La figura 5 muestra el efecto de la resistencia de puesta a tierra en el circuito Cabudare.

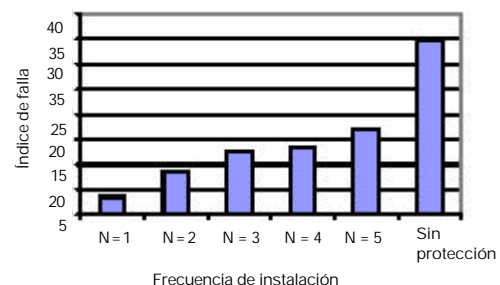
La frecuencia de instalación también influye notablemente en los índices de fallas de la línea protegida. Todas las líneas presentan índices de fallas inferior a 6 fallas/ 100 km/ año para el caso de frecuencia de instalación cada 2 estructuras. La figura 6 muestra el efecto de la frecuencia de instalación de los pararrayos en el circuito Cabudare.

La capacidad energética del pararrayo también es un factor decisivo en la selección de sistemas de protección, ya que a pesar que el pararrayo de 18 kV es más costoso que el de 15 kV, resulta seleccionado por la metodología para la protección de líneas, ya que su probabilidad de falla es menor.



Efecto de la resistencia de puesta a tierra del pararrayo en el circuito Cabudare.

5



Efecto de la frecuencia de instalación del pararrayo en el circuito Cabudare.

6

## CONCLUSIONES

1. Los criterios y parámetros establecidos para el uso de los métodos de sobreaislamiento y descargadores constituyen medios de protección eficaces contra descargas atmosféricas en líneas de distribución.
2. Se evidenció la necesidad de proteger las líneas de distribución de energía eléctrica de las ciudades de Barquisimeto y Cabudare contra descargas atmosféricas.
3. El uso de descargadores de sobretensión distribuidos con resistencia a tierra inferior a 7, constituye una alternativa de orden práctico, viable, para proteger las líneas de distribución de energía eléctrica de la ciudad de Barquisimeto contra descargas atmosféricas.

## REFERENCIAS

1. *Ley del Servicio Eléctrico*. Ministerio de Energía y Minas, p. 35, Caracas, República Bolivariana de Venezuela, 2001.
2. *Normas de Calidad del Servicio de Distribución de Electricidad*, p. 40. Caracas. República Bolivariana de Venezuela. 2000.
3. *ENELBAR. Reporte de interrupciones del servicio eléctrico, Región I, Barquisimeto*, República Bolivariana de Venezuela, años 1994-1999.
4. *Reporte de datos meteorológicos*, Estación Meteorológica, "Teniente Vicente Landaeta Gil", Barquisimeto, República Bolivariana de Venezuela, años, 1994-1999.
5. *IEEE Std. 1410-1997. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electrical Power Overhead Distribution lines*, p, 39, New York, December 1997.
6. Suárez, S.: "Método para la estimación del comportamiento ante rayos de líneas aéreas eléctricas", Tesis presentada en opción al grado científico de Doctora en Ciencias Técnicas, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba, 2001.
7. Vásquez, C.: "Metodología para la selección de sistemas de protección contra descargas atmosféricas en líneas de distribución de energía eléctrica", Tesis presentada en opción al grado científico de Doctora en Ciencias Técnicas, p. 180, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba, 2002.
8. Blanco, C.: "Alternativas para disminuir las interrupciones del servicio eléctrico y los efectos de la contaminación atmosférica en la ciudad de Barquisimeto y zonas adyacentes", p. 114, Tesis presentada en opción a grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, p. 114, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba, Julio, 2001.
9. *COOPER Power Systems. Electrical Distribution Systems Protection*, pp. 171-244, New York. USA. 1990.

## AUTORAS

Carmen Luisa Vásquez  
Ingeniera Electricista, Doctora en Ciencias Técnicas  
Universidad Nacional Experimental Politécnica  
(UNEXPO), Barquisimeto, Venezuela  
e-mail:cvasquez@bqto.unexco.edu.ve

Olga Susana Suárez Hernández  
Ingeniera Electricista, Doctora en Ciencias Técnicas,  
Investigadora Agregada, Centro de Investigaciones y  
Pruebas Electroenergéticas (CIPEL) Instituto Superior  
Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad  
de La Habana, Cuba.  
e-mail:susana@electronica.cujae.edu.cu

María Carolina Blanco  
Ingeniera Electricista, Doctora en Ciencias Técnicas,  
UNEXPO, Barquisimeto, Venezuela  
e-mail:cblanco@bqto.unexco.edu.ve

## REVISTAS CIENTÍFICAS DE LA CUJAE AHORA EN FORMATO ELECTRÓNICO ¡VISÍTENOS!



• <http://intranet/ediciones/>