

# Simulación con ATP de pararrayos para las líneas a 115 y 400 kv de Edelca

## Lightning rod simulation of Edelca 115 and 400 kv tension lines

A. Villa R., G. Carrasco H.

C.V.G. Electrificación del Caroní, C.A. (EDELCA), División de Ingeniería de Sistemas Eléctricos.

Torre General, Piso 1, Av. La Estancia, Chuao, Caracas 1060, Apartado 62413, Venezuela, Teléfonos: 9502609, 9502529.

Fax: 9502350, 9502064, Email: avilla@edelca.com.ve, gcarrasco@edelca.com.ve

### Resumen

*En este trabajo se evalúan a través de simulaciones con modelos matemáticos de pararrayos de ZnO, torres y líneas de transmisión, los posibles beneficios que obtendría EDELCA al instalar pararrayos en paralelo con las cadenas de aisladores en las líneas de transmisión a 115 y 400 kV. El análisis de los resultados obtenidos indicó que la aplicación de esta tecnología permite reducir la tasa de salida forzada de la línea por descargas atmosféricas y la misma dependerá del esquema de instalación utilizado para los pararrayos en la línea de transmisión.*

**Palabras Claves:** Pararrayos, Líneas, Torres, Sobretensión, ATP.

### Abstract

*In this paper through simulations with mathematical models for ZnO arrester, tower and transmission lines are evaluated the EDELCA possible benefits obtain when installing arresters in parallel with insulators strings in the 115 and 400 kV transmission lines. The analysis of the obtained results indicated that the application of this technology allows to reduce the forced failure rate of the line by atmospheric discharges and this is dependent on the installation scheme used for the arresters in the transmission line.*

**Key words:** Arrester, Line, Tower, Overvoltage, ATP.

### 1 Introducción

La instalación de pararrayos en paralelo con las cadenas de aisladores de las líneas de transmisión no es reciente pero su aplicación fue limitada debido al peso de los pararrayos de porcelana, lo que hacía compleja y costosa su instalación en las torres de transmisión. Al combinarse las tecnologías de varistores de óxido de zinc y de aisladores poliméricos para altas tensiones, surgió el pararrayos de óxido de zinc (ZnO) encapsulado en aislamiento polimérico, lo cual facilitó su instalación por ser más liviano y de menor longitud.

Actualmente, se dispone de dos tipos de tecnología de pararrayos para líneas de transmisión; el tipo sin explosor (Gapless) el cual tiene una conexión directa entre el pararrayos y el conductor de fase y el tipo con explosor (Gapped) en donde no existe tal conexión debido al uso de un explosor serie (Gap).

La instalación de pararrayos de ZnO en las torres, se ha utilizado en los últimos años como un método efectivo para disminuir las fallas en las líneas de transmisión ocasionadas

por las descargas atmosféricas en zonas que presentan condiciones de alta resistividad del terreno y/o alto nivel isoceánico, evitando de esta forma la necesidad de aumentar el nivel de aislamiento, disminuir la resistencia de puesta a tierra en las torres o reducir el ángulo de apantallamiento.

### 2 Objetivo

Evaluar a través de simulaciones con modelos matemáticos de pararrayos de ZnO, torres y líneas de transmisión, los posibles beneficios que obtendría EDELCA al instalar pararrayos en paralelo con las cadenas de aisladores en sus líneas de transmisión.

### 3 Criterios de simulación

Los criterios empleados para representar las líneas de transmisión en estudio y considerar el uso de pararrayos de ZnO en sus torres, son los siguientes:

- Las líneas de transmisión se representaron según el esquema de la Figura 1, en donde sus vanos se calcularon

como parámetros distribuidos (R, L y C) no balanceados para una frecuencia de 500 kHz y se incluyeron modelos equivalentes de torres, pararrayos y fuentes de tensión y corriente que representan la tensión de operación de la línea y la descarga atmosférica respectivamente.

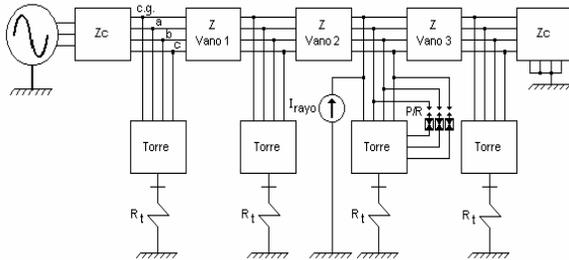


Fig. 1. Esquema del sistema para estudiar los pararrayos de ZnO en líneas de transmisión

- Los pararrayos de línea se evaluaron en líneas típicas de simple y doble circuito a 115 kV y simple circuito a 400 kV, considerando dos valores de resistencia de puesta a tierra, 20 Ω (valor usual) y 200 Ω para representar una puesta a tierra deficiente.

- Para cada línea se simuló el impacto de una descarga atmosférica en el tope de una de sus torres y se determinó si ocurría descargas retroactivas y el orden en que estas se presentaban en cada una de las fases de la línea. Esto se realizó para corrientes pico de rayo de 20, 50, 75, 100, 150 y 200 kA, cuya polaridad debe producir en la torre una sobretensión con magnitud opuesta a la tensión de operación en una de las fases, condición ésta denominada como “fase dominante”. Adicionalmente, en la Tabla 1 se indican los tiempos de cresta a emplear según las magnitudes de corriente de rayo y la tensión de ruptura de la cadena de aisladores (Working group on lightning performance of transmission lines, 1985).

- De los resultados obtenidos en el punto anterior, se seleccionaron los casos más críticos y se colocaron en la torre impactada, pararrayos con explosor en las fases que fallan, para evaluar su comportamiento ante descargas retroactivas.

Tabla 1. Corriente del rayo y tensión de ruptura de la cadena de aisladores en función del tiempo de cresta de la onda

Rango de Corriente del rayo (kA)	Tiempo de cresta de la onda (μs)	Tensión de ruptura de la cadena de aisladores	
		115 kV	400 kV
20	0,5	2.455	7.492
50 a 100	1,2	1.570	4.791
150 a 200	2,0	1.266	3.864

- De la comparación de los resultados obtenidos sin y con pararrayos para línea de transmisión, se determinó la tasa de salida forzada de las líneas por descargas retroactivas. Esta tasa se calculó en función de la probabilidad acumulada que una determinada magnitud de corriente de rayo

exceda el valor que causa descargas retroactivas en la línea (Working group on lightning performance of transmission lines, 1985).

#### 4 Modelos empleados en la simulación

A continuación se describen los modelos matemáticos empleados para representar las cadenas de aisladores, los pararrayos de ZnO, los explosores serie y las torres de transmisión, los cuales se utilizaron con el programa ATP para evaluar el efecto del pararrayos en el comportamiento de las líneas de transmisión ante descargas atmosféricas.

##### 4.1 Modelo equivalente de la cadena de aisladores

Las cadenas de aisladores pueden ser simuladas como una combinación serie-paralelo de capacitancias según se indican en la Figura 2 (a y b), las cuales representan la distribución de potencial hacia la estructura de la torre y la corriente de fuga a lo largo de la cadena. Por otra parte, esta representación se puede simplificar al determinar las capacitancias equivalentes al punto medio de la cadena y a partir de las mismas calcular la capacitancia total para una cadena con “n” aisladores, según se puede observar en la Figura 2c.

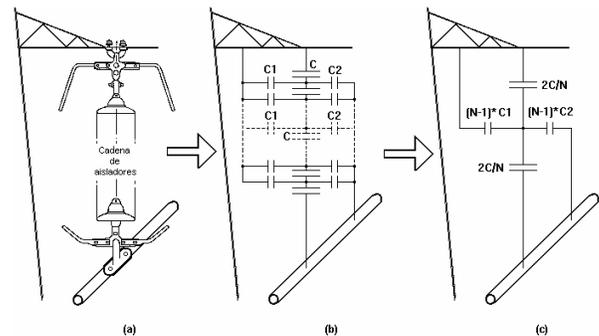


Fig.2. Modelo equivalente de la cadena de aisladores

En la referencia (Bazutkin V. y Col., 1986) se indica que la capacitancia propia del aislador “C” posee valores entre 50 a 70 pF, la capacitancia del aislador a la estructura de la torre “C1” tiene valores entre 4 a 5 pF y la capacitancia del aislador al conductor de fase “C2” posee valores entre 0,5 a 1 pF.

##### 4.2 Modelo equivalente del explosor serie

El explosor serie asociado al pararrayos puede ser representado por medio de un interruptor controlado por tensión, el cual cierra sus contactos al superarse la tensión de descarga del explosor (TDE) por las sobretensiones producidas por las descargas atmosféricas, un circuito resistivo - inductivo (RL) en serie con el interruptor para considerar la longitud de los electrodos del explosor y una capacitancia (C) en paralelo con el conjunto anterior para uniformizar el

gradiente eléctrico entre los extremos del explosor (Naito K. y Col., 1996), tal y como se ilustra en la Figura 3 a y b.

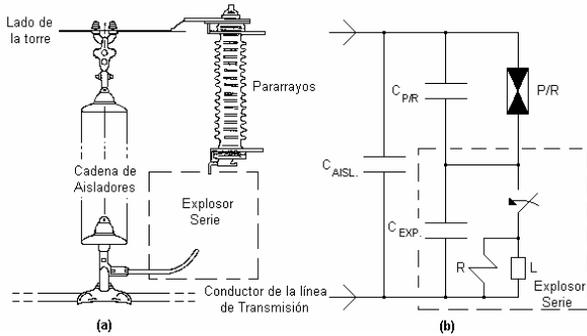


Fig.3. Modelo equivalente del explosor serie

La inductancia del circuito resistivo - inductivo (RL) tiene un valor de 1μH y se conecta en paralelo con una resistencia de amortiguamiento para evitar posibles conmutaciones indeseadas del interruptor controlado por tensión debido a oscilaciones numéricas (Lasseter R. y Col., 1988).

En la Tabla 2 se indican las longitudes y tensiones de descarga por impulsos atmosféricos de explosores serie empleados en distintos sistemas de transmisión (Kawamura T. y Col., 1994; Ishikawa K. y Col., 1992) y a partir de la cual se determinaron las siguientes expresiones para calcular la longitud del explosor serie (LES) en función de la tensión fase a fase del sistema y la tensión de descarga por impulsos atmosféricos (TDE) del mismo en función de su longitud.

Tabla 2. Longitudes y tensiones de descarga de los explosores

Vff (kV)	LES (m)	TDE (kV)	Vff/LES (kV/m)	TDE/LES (kV/m)
77	0.43	290	179	674
275	1.20	730	229	608
500	1.80	1.125	278	625
		Promedio	229	636

Nota : Vff es tensión fase a fase del sistema.  
LES es longitud del explosor serie.  
TDE es tensión de descarga del explosor serie.

$$LES \cong Vff / 229 \quad [m] \quad (1)$$

$$TDE \cong 636 * LES \quad [kV] \quad (2)$$

### 4.3 Modelo equivalente de torres de transmisión

Las torres de transmisión pueden ser representadas por una combinación de varias líneas de transmisión con sus respectivas impedancias características y tiempo de propagación, en serie con su resistencia de puesta a tierra. La impedancia característica de estas líneas se determinó a través de la aproximación a la geometría de un cono o cilindro de las partes que conforman la torre (cuerpo central, laterales, ménsulas, etc.) y el tiempo de propagación en las mismas, se calculó como la relación existente entre las alturas de di-

chos conos o cilindros y el 70% de la velocidad de propagación de la luz para considerar la propagación en un medio diferente al vacío (Working group on lightning performance of transmission lines, 1985; Chisholm W. y Col., 1985; Nguyen H. y Col., 1994).

Las ecuaciones empleadas para el cálculo de las impedancias características de un cono o cilindro son las siguientes:

$$Z_{cono} = 30 \text{Ln}[2(h^2 + r^2)/r^2] \quad [\Omega] \quad (3)$$

$$Z_{cilindro} = 60 [\text{Ln}(2h\sqrt{2}/r) - 1] \quad [\Omega] \quad (4)$$

En donde:

h = altura del cono o cilindro [m].

r = radio del cono o cilindro [m].

### 4.4 Modelo equivalente del pararrayos de ZnO

Los pararrayos de ZnO pueden ser simulados por medio de una aproximación de su característica no lineal de voltaje versus corriente, en paralelo con una capacitancia que representa la distribución de potencial y corriente de fuga del aislamiento del equipo, tal y como se mostró en la Figura 3. Para representar la característica no lineal de los pararrayos que se muestra en la Figura 4, se debe determinar los parámetros de la siguiente ecuación:

$$I = (Vn / Vref)^\alpha \quad [A] \quad (5)$$

En donde:

I = Corriente de descarga del pararrayos.

Vn = Tensión aplicada a los bornes del pararrayos.

Vref = Tensión de operación del pararrayos.

α = Exponente de no-linealidad.

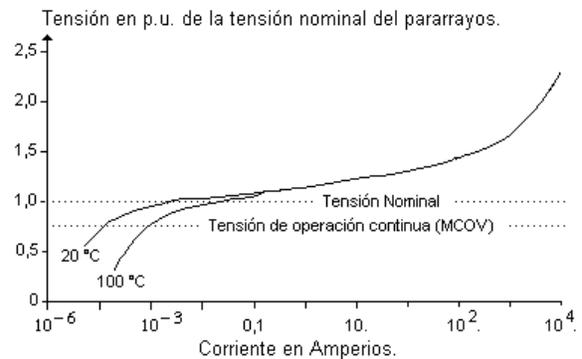


Fig. 4. Característica de tensión versus corriente del pararrayo de ZnO

Las referencias consultadas no incluyen los valores de tensión y corriente de la característica no lineal del pararrayos para línea de transmisión, por lo que se asumió igual a

los pararrayos de subestación y a partir de este se determinó la tensión de operación del pararrayos ( $V_{ref}$ ) y su exponente de no-linealidad ( $\alpha$ ) a ser utilizados en la ecuación "5". Por otra parte, al aproximar con una curva exponencial dicha característica, se obtuvo que la tensión de operación ( $V_{ref}$ ) es 60% de la tensión residual cuando el pararrayos descarga una corriente de 10 kA para una onda de 8/20  $\mu$ s y su exponente de no-linealidad posee valores entre 16,26 a 19,33.

En la Tabla 3, se presenta una comparación de las tensiones residuales por descarga de ondas de corriente de 10 kA y 8/20  $\mu$ s de los pararrayos de ZnO para subestaciones (General Electric, 1990) y líneas de transmisión sin explorador serie (Ohio Brass, 1994). En dicha tabla se puede apreciar que la tensión residual es 8 a 29,2% mayor en los pararrayos de líneas de transmisión y por consiguiente, la tensión de operación ( $V_{ref}$ ) del modelo debe ser incrementada en el mismo porcentaje dependiendo de la tensión nominal del pararrayos.

Tabla 3. Comparación entre pararrayos de ZnO para subestaciones y torres de líneas de transmisión

Tensión nominal del Pararrayos (kV rms)	Tensión residual por descarga de onda de corriente de 10 kA y 8/20 $\mu$ s		Diferencia Porcentual (%)
	Pararrayos		
	Subestación (kV pico)	Línea (kV pico)	
9	24	32	8,0
10	27	32	16,6
18	48	64	25,3
21	54	64	16,3
30	76	96	20,4
36	92	128	28,4
54	122	160	23,8
60	136	192	29,2
96	218	288	24,3
108	245	320	23,4
168	380	512	25,8
172	389	544	28,5
180	408	576	29,2

### 5 Resultados

Los resultados obtenidos de las simulaciones para evaluar el efecto de los pararrayos para líneas de transmisión a 115 y 400 kV son los siguientes:

#### 5.1 Línea simple terna a 115 kV

Una línea simple terna a 115 kV con torres de transmisión como la mostrada en la Figura 5 fue simulada empleando los criterios y los modelos descritos anteriormente.

En la Tabla 4, se presentan los resultados obtenidos sin y con la instalación de pararrayos para una línea simple terna a 115 kV en función de la resistencia de puesta a tierra de sus torres

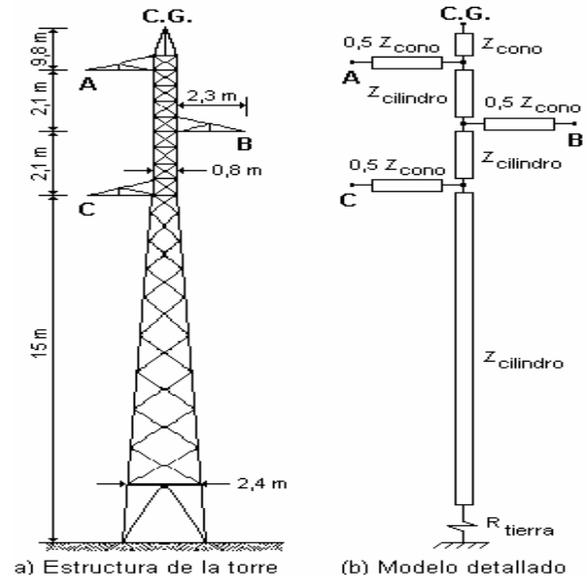


Fig. 5. Torre simple terna a 115 kV y modelo detallado

Tabla 4. Resultados obtenidos sin y con la instalación de pararrayos para una línea simple terna a 115 kV

I rayo (kA)	Pr. Ac. (%)	Resistencia de puesta a tierra					
		20 $\Omega$			200 $\Omega$		
		Sin P/R	1P/R (b)	2P/R (b,c)	Sin P/R	1P/R (a)	2P/R (a,b)
20	76	-	-	-	-	-	-
50	22	-	-	-	F	F	F
75	9	F	-	-	F	F	F
100	5	F	-	-	F	F	F
150	2	F	F	-	F	F	F
200	1	F	F	F	F	F	F

Nota: Las letras (a, b y c) indican las fases donde se instalaron pararrayos (P/R) y la "F" indica falla en alguna de las fases.

De la tabla anterior se puede observar lo siguiente:

- En la línea simple terna sin pararrayos en sus torres ocurren descargas retroactivas cuando los rayos con magnitudes iguales o mayores a 50 ó 75 kA impactan sus torres y éstas poseen resistencias de puesta a tierra de 200 ó 20  $\Omega$  respectivamente. Estos resultados indican que rayos con menores magnitudes de corriente pueden causar fallas en líneas por descargas retroactivas al poseer sus torres una alta resistencia de puesta a tierra y en consecuencia la tasa de salida forzada se eleva.

- Al instalar pararrayos en la fase "B" fue necesaria una corriente de rayo de 150 kA para causar fallas por descargas retroactivas en las fases no protegidas. De igual forma, dicha corriente se incrementa a 200 kA cuando se instalaron pararrayos en las fases B y C.

- La instalación de pararrayos en todas las fases de la línea simple terna evitan fallas por descargas retroactivas cuando la resistencia de puesta a tierra es alta (200 Ohmios).

- Con base en los resultados anteriores se observó que al instalar pararrayos se requieren mayores corrientes de rayo para producir descargas retroactivas en las fases no protegidas y como la probabilidad de existencia de un rayo es inversamente proporcional a su magnitud de corriente según se indicó en la Tabla 4, entonces la línea presentará una menor probabilidad de descargas retroactivas cuando posee pararrayos y en consecuencia su tasa de salida forzada será menor.

En las Figuras 6 y 7 se muestran las formas de onda de las sobretensiones de fase a tierra y las corrientes a través de los pararrayos de ZnO para una línea a 115 kV, obtenidas para una torre impactada por una descarga atmosférica de 150 kA y la ubicada un vano después al considerar resistencias de puesta a tierra de  $20\Omega$  en sus torres.

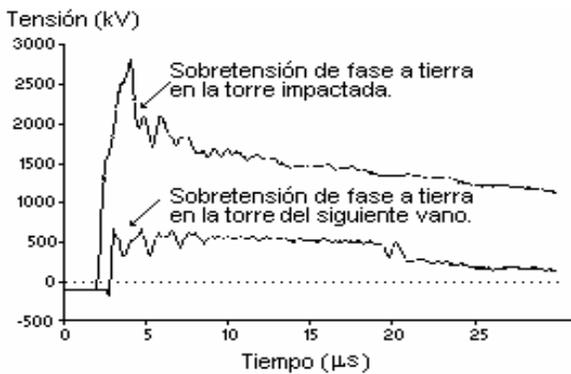


Fig. 6. Sobretensión de fase a tierra línea a 115 kV

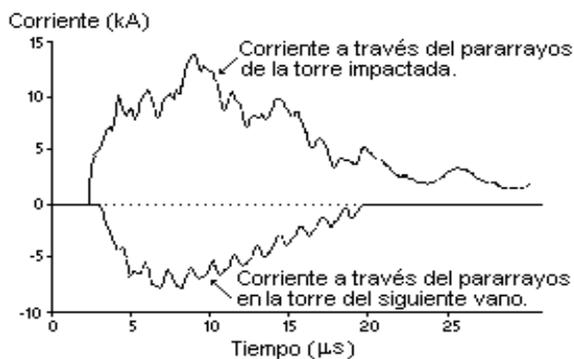


Fig. 7. Corrientes a través de los pararrayos a 115kV

En dichas Figuras se puede observar el tiempo que tarda en viajar la sobretensión en un vano de la línea y su disminución por la atenuación propia de la misma, además de las corrientes a través de los pararrayos de ZnO que indican en la torre impactada un flujo de corriente de la torre hacia

el conductor de fase y su cambio de sentido en la siguiente torre.

5.2 Línea doble terna a 115 kV

Una línea doble terna a 115 kV con torres de transmisión como la mostrada en la Figura 8 fue simulada empleando los criterios y los modelos descritos anteriormente.

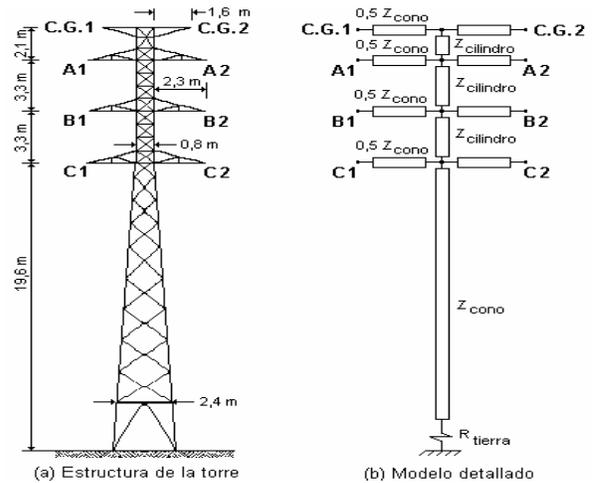


Fig. 8. Torre doble terna a 115 kV y modelo detallado

En la Tabla 5, se presentan los resultados obtenidos sin y con la instalación de pararrayos para una línea doble terna a 115 kV en función de la resistencia de puesta a tierra de sus torres.

Tabla 5. Resultados obtenidos sin y con la instalación de pararrayos para una línea doble terna a 115 kV

I rayo (kA)	Pr. Ac. (%)	Resistencia de puesta a tierra							
		20Ω			200Ω				
		Sin P/R	1P/R 1,a	2P/R 1,a 2,a	Sin P/R	1P/R 1,a	2P/R 1,a 2,a	3P/R 1,a,b,c	4P/R 1,a,b 2,a,b
20	76	-	-	-	-	-	-	-	-
50	22	-	-	-	FC1 FC2	-	-	-	-
75	9	-	-	-	FC1 FC2	FC2	FC2	-	-
100	5	FC1 FC2	-	-	FC1 FC2	FC1 FC2	FC1 FC2	-	-
150	2	FC1 FC2	FC2	-	FC1 FC2	FC1 FC2	FC1 FC2	-	FC1 FC2
200	1	FC1 FC2	-	-	FC1 FC2	FC1 FC2	FC1 FC2	-	FC1 FC2

Nota: El número 1 ó 2 indican el circuito trifásico. Las letras "a, b y c" indican las fases donde se instalaron pararrayos (P/R). FC1 y FC2 indican falla en circuito 1 ó 2 respectivamente.

De la tabla anterior se puede observar lo siguiente:

- En la línea doble terna sin pararrayos en sus torres ocurren fallas de doble circuito por descargas retroactivas cuando los rayos con magnitudes iguales o mayores a 50 ó 100 kA impactan sus torres y éstas poseen resistencias de puesta a tierra de 200 ó 20 Ω respectivamente. Estos resultados indican que rayos con menores magnitudes de corriente pueden causar fallas en líneas por descargas retroactivas al poseer sus torres una alta resistencia de puesta a tierra.

- Al instalar pararrayos en la fase “A” de uno de los circuitos, los rayos con magnitudes iguales o mayores a 150 kA causan descargas retroactivas en el otro circuito cuando las torres poseen una resistencia de puesta a tierra de 20Ω. Lo anterior, representa un incremento del 50% en la magnitud de la corriente del rayo necesaria para causar falla por descarga respecto al caso sin pararrayos, además que las fallas dejan de ser de doble circuito.

- La instalación de pararrayos en las fases “A” de los dos circuitos, tiene por efecto que solamente los rayos con corrientes mayores a 200 kA podrán provocar fallas en la línea por descargas retroactivas cuando las torres poseen una resistencia de puesta a tierra de 20Ω.

- La instalación selectiva de pararrayos en las fases de los circuitos para evitar fallas por descargas retroactivas, produce diferentes beneficios según el esquema utilizado, cuando la línea doble terna posee torres con resistencias de puesta a tierra de 200Ω. Entre estos beneficios se apreció que la instalación de pararrayos en las tres fases de una terna, eliminaba la probabilidad de falla de doble circuito, se requirieron menos pararrayos en comparación con la instalación de estos equipos en dos fases de cada terna y además para producir descargas retroactivas en el otro circuito, se necesitan rayos con corrientes iguales o mayores a 100 kA los cuales poseen una baja probabilidad de ocurrencia.

- Los resultados anteriores indican que la instalación de pararrayos para líneas de transmisión permiten reducir la tasa de salida forzada de la línea debido a la menor probabilidad de ocurrencia de rayos con elevadas magnitudes de corriente.

### 5.3 Línea simple terna a 400 kV

Una línea simple terna a 400 kV con torres de transmisión como la mostrada en la Figura 9 fue simulada empleando los criterios y los modelos descritos anteriormente.

En las simulaciones realizadas para la línea simple terna a 400 kV con magnitudes de rayos hasta 200 kA no ocurrieron descargas retroactivas cuando sus torres poseen una resistencia de puesta a tierra de 20Ω, razón por la cual no se consideró necesario evaluar el efecto de instalar pararrayos en sus torres.

En la Tabla 6, se presentan los resultados obtenidos sin y con la instalación de pararrayos para una línea simple terna a 400 kV cuando sus torres tienen una resistencia de puesta a tierra de 200Ω.

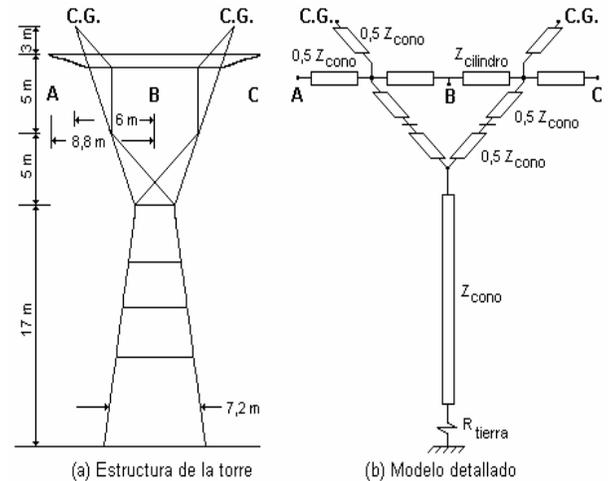


Fig. 9. Torre simple terna a 400 kV y modelo detallado

Tabla 6. Resultados obtenidos sin y con la instalación de pararrayos para una línea simple terna a 400 kV

I rayo (kA)	Pr. Ac. (%)	Resistencia de Puesta a tierra de 200Ω		
		Sin P/R	1 P/R (a)	2 P/R (a y a)
20	76	-	-	-
50	2	-	-	-
75	9	F	-	-
100	5	F	-	-
150	2	F	F	F
200	1	F	F	F

Nota: Las letras (a, b y c) indican las fases donde se instalaron pararrayos (P/R) y la “F” indica falla en alguna de las fases.

De la tabla anterior se puede observar lo siguiente:

- En la línea simple terna sin pararrayos en sus torres ocurren fallas por descargas retroactivas cuando rayos con magnitudes iguales o mayores a 75 kA impactan sus torres y éstas poseen resistencias de puesta a tierra de 200 Ω. Estos resultados indican que rayos con menores magnitudes de corriente pueden causar fallas en líneas por descargas retroactivas al poseer sus torres una alta resistencia de puesta a tierra.

- La instalación de pararrayos en la fase “A” o en las fases “A y C” de la línea tiene por efecto que los rayos con magnitudes iguales o mayores a 150 kA causen fallas por descargas retroactivas en otras fases, representando esto un incremento del 100% en la magnitud de la corriente del rayo al compararlo con los resultados del caso sin pararrayos, además que reducen la tasa de salida forzada de la línea debido a la menor probabilidad de ocurrencia de rayos con elevadas magnitudes de corriente.

- Finalmente, es necesario instalar pararrayos en todas las fases para evitar fallas por descargas retroactivas cuando se tiene una alta resistencia de puesta a tierra.

## 6 Conclusiones

- Los resultados obtenidos de las simulaciones para las líneas de transmisión a 115 y 400 kV indican que la instalación de pararrayos para líneas de transmisión permiten reducir la tasa de salida forzada de la línea debido a la menor probabilidad de ocurrencia de rayos con elevadas magnitudes de corriente.

- La instalación selectiva de pararrayos en las fases de los circuitos para evitar fallas por descargas retroactivas y reducir la tasa de salida forzada de la línea, produce diferentes beneficios según el esquema que se utilice. Entre estos beneficios se apreció que la instalación de pararrayos en las tres fases de una línea doble terna, eliminaba la probabilidad de falla de doble circuito y que en el caso de una línea simple terna la instalación de estos equipos en las tres fases produce la mayor reducción de la tasa de salidas forzadas. Sin embargo, la instalación de pararrayos en algunas fases de la línea o en ciertos tramos de la misma dependerá de la importancia de la línea para el sistema, la reducción deseada de la tasa de salida forzada de la línea por descargas atmosféricas y de la inversión disponible.

## Referencias

Working group on lightning performance of transmission lines., April 1985, A simplified method for estimating lightning performance of transmission lines *IEEE Trans. on power apparatus and systems*, Vol. Pas-104., N° 4,

Bazutkin V., Larionov V., Pintal I. , Moscu, 1986, Técnicas de alta tensión, *Editorial "Energía-atómica"*,  
 Naito K., Irie T., Ichioka T., 1996, Protection of power line from lightning, *NGK insulators LTD.*  
 Lasseter R., Fehrl K., April 1988, "Electromagnetic transients program (EMTP) workbook IV (TACS)", EPRI, research project 2149-6.  
 Kawamura T., Nagano M, Ichihara M, Ishikawa K., 1994, Development of metal-oxide transmission line arrester and its effectiveness, *CIGRE.*  
 Ishikawa K., Dokai K., July 1992 "Development of a 500 kV transmission line arresters and its characteristics", *IEEE Transactions on power delivery*, Vol. 7., N° 3.  
 Chisholm W., Chow Y., October 1985, Travel time of transmission towers, *IEEE Transactions on power apparatus and systems*, Vol. Pas-104., N° 10.  
 Nguyen H., Dommel H., Marti J., February 1994, Towers models for lightning surge simulations, *IEEE Winter meeting*,  
 GENERAL ELECTRIC, 1990, "Tranquell station surge arrester", application guide.  
 OHIO BRASS, 1994, "Lightning protection for distribution and transmission systems", *Protecta lite systems catalog 400.*  
 Working Group 33.02 (Internal Overvoltages), 1990, "Guidelines for representation of network elements when calculating transients", *CIGRE.*  
 LEUVEN EMTP Center, 1993. "Alternative Transients Program", Rule Book.