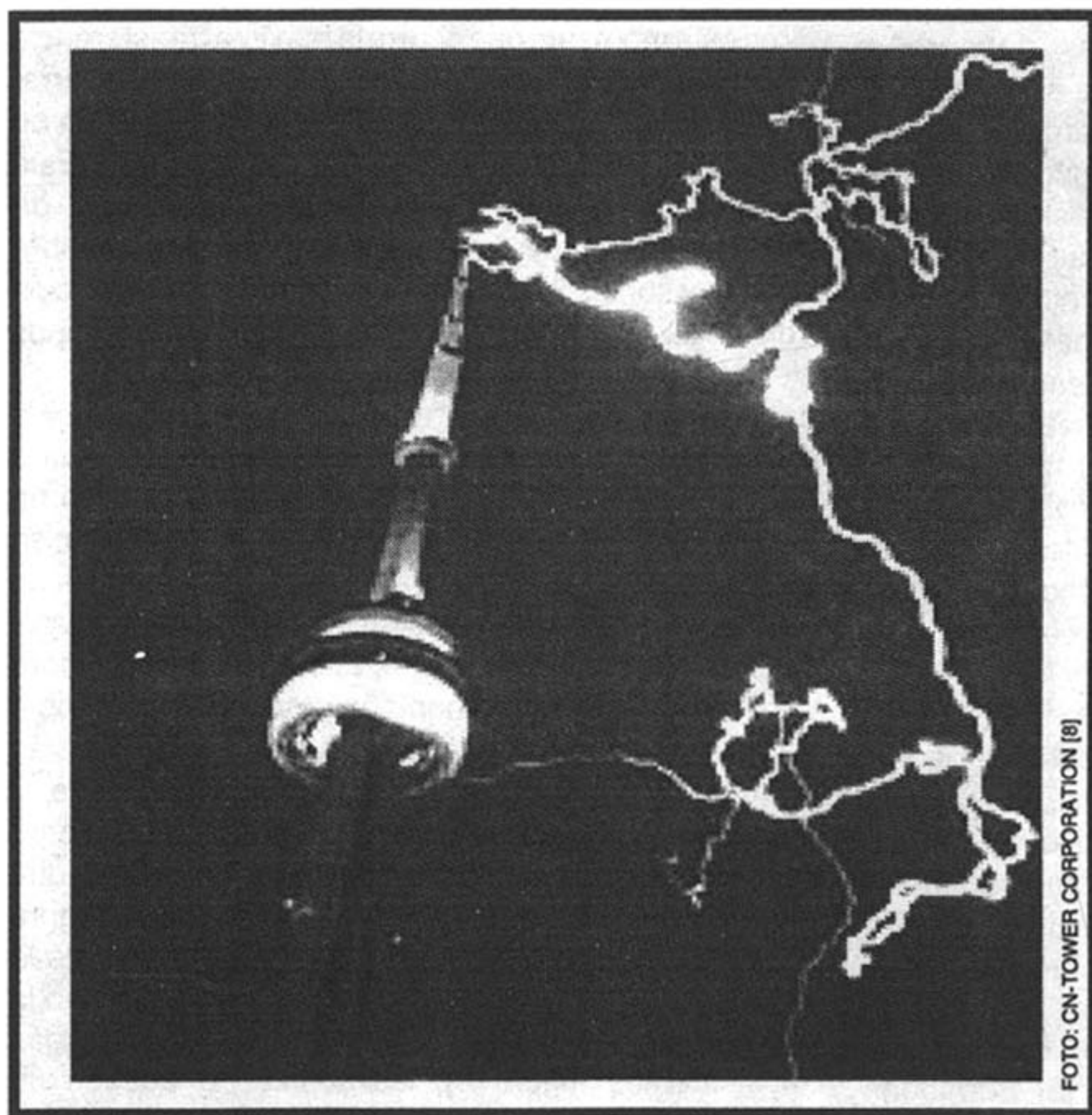


Medida de corriente de descargas atmosféricas mediante torres instrumentadas



□ **José Luis Bermúdez, M. Sc.**
Doctorando, Laboratorio de
Redes de Energía Eléctrica,
Escuela Politécnica Federal
de Lausana, Lausana-Suiza.

RESUMEN

Este artículo muestra la importancia de la medida directa de las corrientes producidas por una descarga atmosférica en el diseño y calibración de sistemas expuestos a impactos directos de rayos y para la estimación de otros componentes asociados a la descarga. Hace énfasis en el uso de torres instrumentadas para la medida de

dichas corrientes, y describe los efectos aportados por estas torres a su forma de onda ("contaminación" de la corriente), al igual que las técnicas actuales para su "descontaminación". Se detallan las partes que componen los sistemas de medida directa de corriente, así como los útiles que conforman cada una de estas partes. Se argumenta que a pesar de los avances logrados en la medida de estas corrientes, muchos efectos deben aun ser estudiados.

PALABRAS CLAVES

Descargas atmosféricas, torres instrumentadas, rayos, medida de corriente de rayos, contaminación de las medidas de corriente de descargas atmosféricas.

ABSTRACT

This paper present the importance of direct measurements of lightning current, for the design and calibration of aerial system highly exposed to lightning return strokes, and for the estimation of other parameters related with lightning. This paper mention an historical overview of the utilization of instrumented towers for the measurement of lightning currents, as a description of the diverse parts conforming these systems. We describe some modifications introduced by the instrumented towers in the waveform

* La Revista recibió este artículo en octubre de 2.000

of the original lightning current - "contamination". Moreover, "decontamination" techniques are proposed

KEYWORDS:

Lightning discharges, instrumented towers, lightning current reflection, contaminated lightning.

1. INTRODUCCIÓN

Un rayo es el momento de intercambio de la carga almacenada en una nube con un objeto conductor de carga opuesta, en el caso mas frecuente con otra nube. Las descargas entre la nube y la tierra, aunque no son las más frecuentes, son las mas estudiadas dado que son ellas las que interactúan con nuestro entorno y que generan el mayor número de accidentes. En general, el rayo esta compuesto por varias descargas atmosféricas que ocurren normalmente en menos de un segundo; en el momento de la descarga se genera una corriente muy alta ("return stroke") que en tan solo unos cuantos microsegundos puede destruir o poner fuera de funcionamiento sistemas construidos por el hombre, ya sea de manera directa (impacto directo) o indirecta (acoplamiento electromagnético). Estas corrientes han sido medidas y utilizadas en: (1) la creación y calibración de modelos teóricos de propagación de los campos electromagnéticos asociados con la descarga; (2) la calibración de protecciones y coordinación de aislamiento de sistemas eléctricos de potencia y de telecomunicaciones; (3) el diseño de protecciones de estructuras elevadas, que poseen alto riesgo de ser alcanzadas por los rayos; (4) la calibración de sistemas de prevención; y (5) en la creación y ajuste de modelos de sistemas de localización de rayos (Lightning Location Systems, LLS), muy utilizados actualmente. Dado este amplio número de aplicaciones, que utilizan la corriente como parámetro esencial, es imperioso que los sistemas desarrollados para la medida de la misma posean una alta confiabilidad y una gran precisión.

Recientes trabajos desarrollados, por ejemplo por Guerrieri et al. [1], Janischewskyj et al. [2], Bermudez et al. [3], Diendorfer [4], han demostrado que la corriente medida del rayo puede ser alterada en su forma y en su valor máximo por efectos ocurridos al interior del sistema de medida, por ejemplo en torres instrumentadas; estos estudios nos revelan que a pesar de los avances logrados en la medida de estas corrientes, numerosos efectos deben aun ser estudiados. Algunos de los trabajos citados serán mencionados con mayor detenimiento en el contenido del artículo.

Este artículo además de describir el proceso de formación de una descarga atmosférica, sección 2; introduce, en la sección 3, los métodos utilizados en la actualidad para la medida directa de la corriente del rayo; realiza un recuento histórico del uso de torres

instrumentadas para la medida directa de corriente de rayos, sección 4; e introduce, en la sección 5, las partes que componen este tipo de sistemas; en la sección 6 se examinan los efectos introducidos por la torre instrumentada en la forma de onda de la corriente de la descarga; y finalmente la sección 7 es dedicada a las conclusiones y comentarios.

2. LA DESCARGA ATMOSFÉRICA

El "return stroke" es uno de los componentes del rayo que más ha sido estudiado debido a que son ellos los que interactúan y producen mayores daños al conectarse con la tierra, e igualmente son los más fáciles de observar y medir por la alta luminosidad asociada y por las ondas electromagnéticas producidas; es en este momento que ocurre la máxima transferencia de carga entre la nube y otro conductor, como la tierra, y en el que aparece una corriente muy elevada en un periodo de tiempo muy corto (microsegundos). Esta corriente origina ondas electromagnéticas de características muy definidas que se propagan sobre la tierra y son utilizadas por los sistemas de detección a distancia, y en estudios de acoplamiento entre campos electromagnéticos y estructuras conductoras [5].

La producción de un "return stroke" nube-tierra comienza por la formación del líder que en la mayoría de los casos va construyéndose paso a paso, en un proceso conocido como "stepped leader" (figura 1); en este proceso puede observarse una arborescencia en el canal hasta que se establece un camino claro. Cuando el "stepped leader" se acerca a una estructura conductora, como una montaña, una torre, un avión o un árbol, el campo eléctrico producido por la carga en el líder crea descargas eléctricas emitidas desde la estructura conductora conocidas como "streamers", líderes de conexión o descargas de conexión, que aceleran el proceso de conexión final a la tierra (figura 2). El camino final producido por el líder, "canal de la descarga", origina el primer "return stroke" y es, en la mayoría de los casos, utilizado por las descargas subsecuentes (figura 3), las cuales no poseen un proceso paso a paso como el observado en la primera descarga [5]. El rayo esta, por consiguiente, compuesto de varios "return strokes" separados por tiempos del orden de los milisegundos y de una duración aproximada a la centena de microsegundos. De acuerdo con el tipo de carga desplazada y del inicio del líder podríamos definir respectivamente rayos positivos o negativos y descendentes o ascendentes.

3. MEDIDA DIRECTA DE LA CORRIENTE DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Una descarga atmosférica puede caracterizarse mediante la medición de parámetros propios como, la

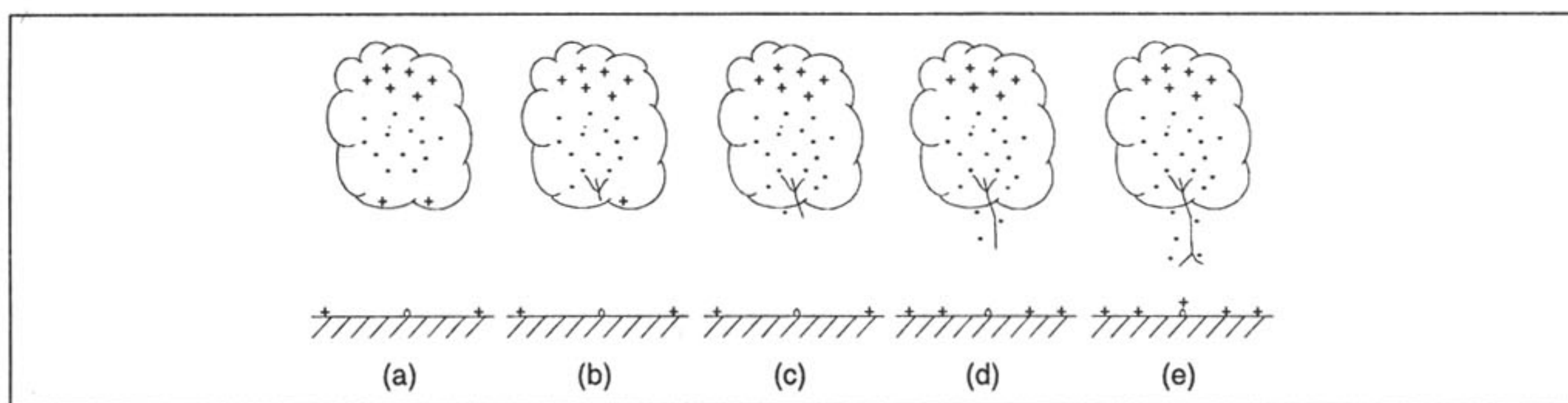


Figura 1. Formación del líder de un rayo [5]

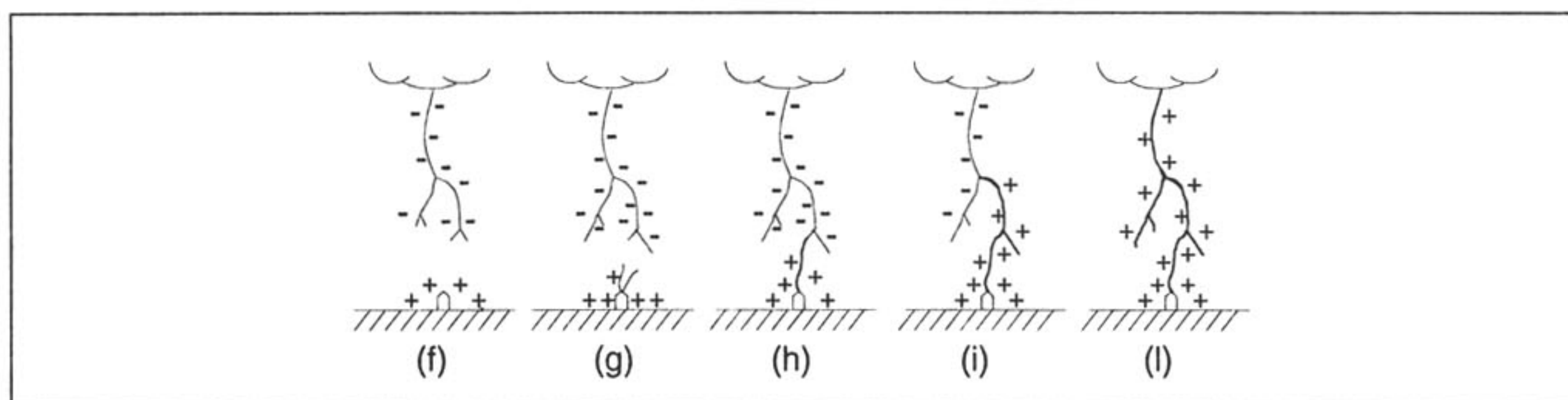


Figura 2. Aparición del "streamer" para la conexión final del "return stroke" [5]

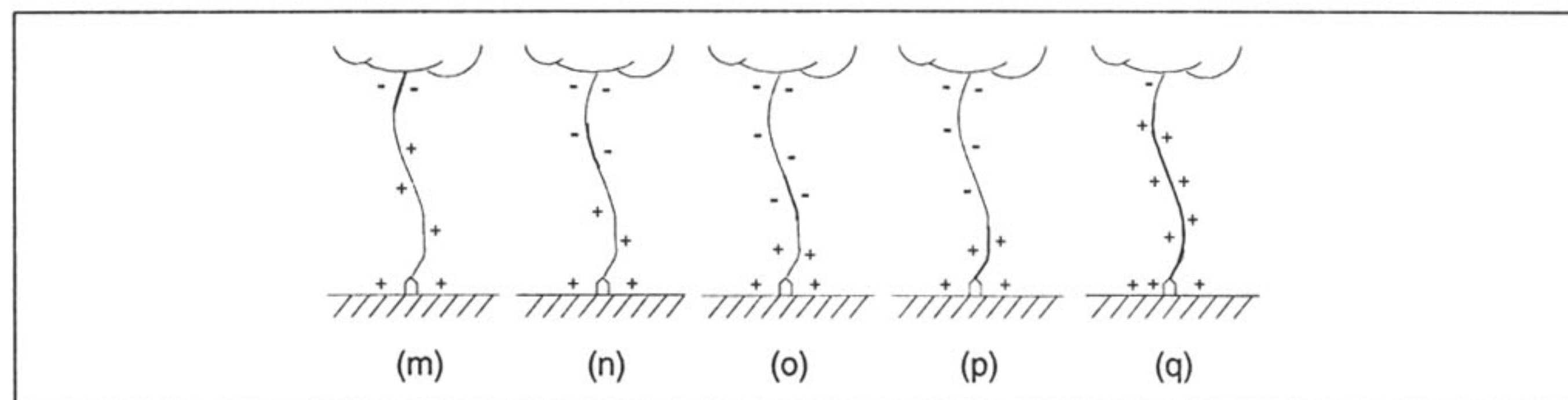


Figura 3. Descargas atmosféricas subsecuentes [5]

luz emitida por el rayo, el sonido o trueno producido, la medida de campos electromagnéticos emitidos o por la medida directa de la corriente asociada. Entre ellos el parámetro más importante es la corriente que permite evaluar la severidad de la descarga y permite la calibración de modelos del "return stroke" y de propagación de los campos electromagnéticos.

Para medir directamente las corrientes producidas por los rayos se utilizan dos métodos: la creación artificial de descargas atmosféricas y las torres instrumentadas. El primer método de medida de corriente directa denominado "triggered lightning" o de rayos inducidos, genera artificialmente una descarga atmosférica con la ayuda de pequeños cohetes lanzados hacia la nube en un momento de alta diferencia de potencial eléctrico entre la nube y la tierra. Los cohetes están conectados físicamente a la tierra mediante conductores delgados que son pulverizados por la intensa corriente producida en el momento de la descarga. La corriente es medida en la base del conductor, que esta conectado a la tierra.

El segundo método utiliza torres instrumentadas, en las cuales se instalan instrumentos de medida de la corriente de la descarga para su posterior análisis. La ubicación de estos medidores de corriente en las torres fue inicialmente en la base; sin embargo, actualmente se exploran otras posiciones a diferentes alturas a lo largo de la torre. La posición del medidor de corriente en la torre tiene especial importancia para los estudios de la influencia de la torre sobre la corriente medida, como se mencionará en la sección 6. Este método, con torres instrumentadas, podría asociarse con el método de descargas inducidas dado que utiliza una estructura elevada, artificialmente creada por el hombre, para lograr la conexión de la descarga atmosférica entre la nube y la tierra; no obstante, en este caso, la altura de la torre es constante, lo cual otorga la libertad al rayo de producirse cuando los niveles de desbordamiento de carga acumulada en la nube son naturalmente alcanzados.

M. A. Uman [5], a partir de las estadísticas de las medidas realizadas en varios sistemas en distintas partes del mundo, estableció que no existe una clara diferencia entre las medidas de descargas con "triggered lightning" o torres instrumentadas. No obstante, menciona que descargas subsecuentes que impactan sobre torres poseen características similares a descargas subsecuentes naturales; lo cual no puede generalizarse para corrientes de rayos capturados mediante descargas inducidas. Las apreciaciones realizadas por Uman consideran como rayos naturalmente producidos aquellos que impactan en torres de baja altura. Guerrieri et al. [1], han demostrado que la presencia de torres de baja altura modifica algunos de los componentes del rayo, lo cual sugiere la realización de nuevas comparaciones para los dos métodos de medida de corriente directa, tomando en cuenta dichas modificaciones.

Una disertación sobre cual de los dos métodos es el mas adecuado para la medida directa de la corriente del rayo puede extenderse notablemente y se aleja de los objetivos trazados en este artículo. No obstante, algunas consideraciones deben tenerse en cuenta en la medida de corrientes de rayos con torres instrumentadas, las cuales serán mencionadas en la sección 5.

4. CRONOLOGÍA DE LAS MEDIDAS DE CORRIENTE DE RAYOS CON TORRES INSTRUMENTADAS

El primer estudio científico que se conoce sobre las descargas atmosféricas fue realizado a mediados del siglo XVIII por Benjamín Franklin, quien fue la primera persona en asociar los rayos con la electricidad. Desde entonces son muchos los progresos alcanzados por el hombre en la comprensión de este fenómeno.

Uno de los pioneros de las medidas de corriente producida por las descargas atmosféricas nube-tierra utilizando torres instrumentadas fue el grupo de K. Berger en Suiza quien comenzó sus trabajos en los años 40, y caracterizó los rayos en términos de la dirección del movimiento y del signo de la carga del líder que inicia la descarga [6]. El estudio estadístico de la medida de corriente de descargas atmosféricas a la base del canal realizado por Berger es uno de los estudios más completos conocido hasta el momento y los resultados encontrados son utilizados aún en nuestros días; la figura 4 presenta un diagrama promedio normalizado de los resultados obtenidos por Berger para el primer y subsecuente "return stroke", respectivamente. Berger utilizó inicialmente dos torres de 55 m de altura localizadas en el monte San Salvatore en Lugano a 915 m sobre el nivel del mar, con las cuales medía la corriente del rayo en la parte alta de la torre con una resistencia tipo shunt (sección 5) [1, 5, 6].

La tabla 1 resume las características obtenidas por Berger para el primer y subsecuente "return stroke".

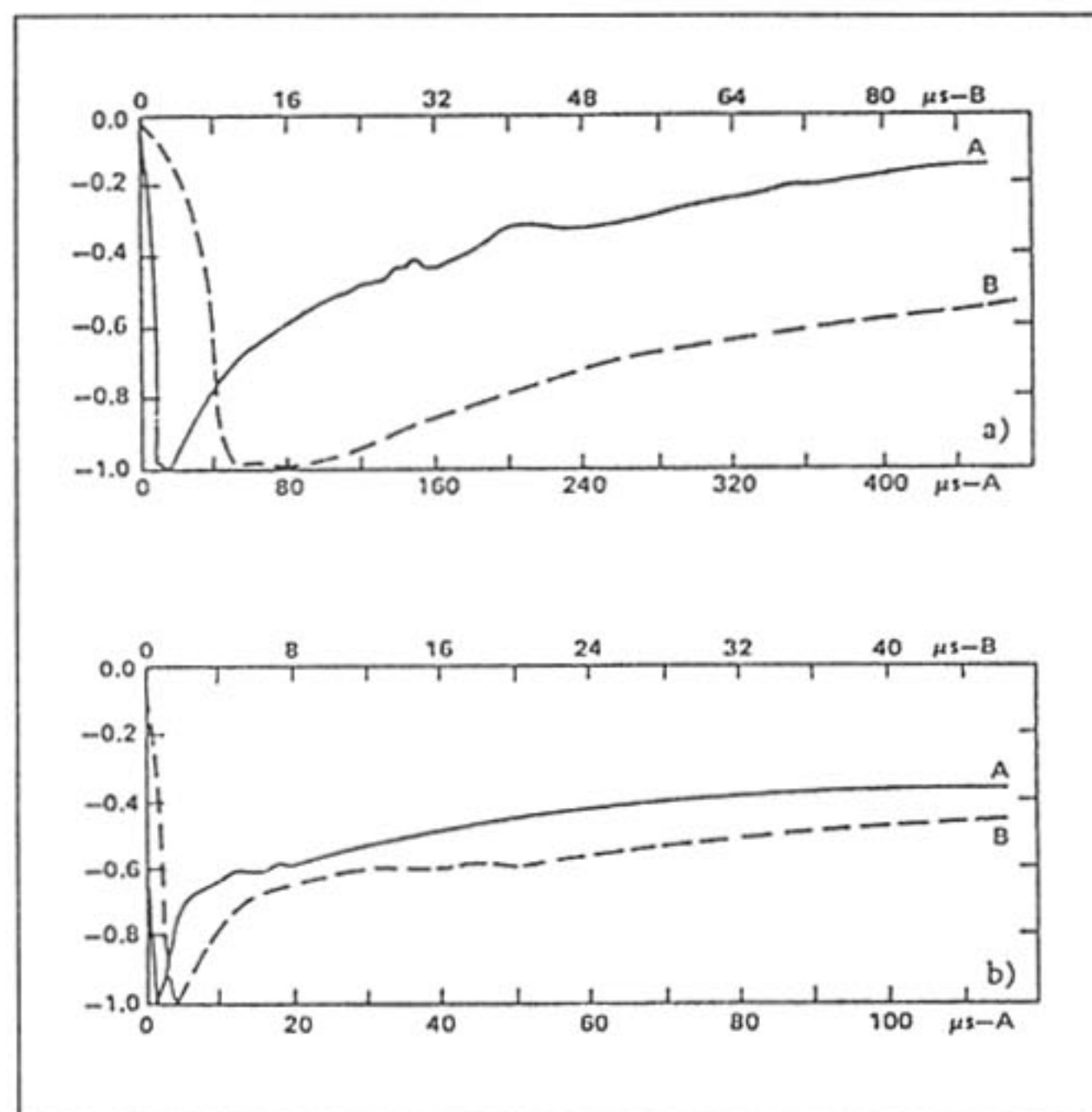


Figura 4. Forma de onda promedio normalizada de la corriente de descargas para: a) primer y b) subsecuente, "return stroke" [6]

Otro grupo importante fue el de Garbagnati y Lo Piparo, en Italia, quienes desarrollaron medidas similares a las de Berger en torres de televisión de 40 m de altura. Ellos midieron, igual que Berger, la corriente en la parte alta de la torre. Las torres estaban localizadas en la cima de dos montañas a 900 m aproximadamente sobre el nivel del mar.

Erikson, en Sur África, con una torre de 60 m localizada en un terreno relativamente plano, midió igualmente la corriente de descargas atmosféricas. La torre fue aislada de la tierra y la corriente del rayo medida por un transformador o una bobina tipo Rogowski (sección 4). Las medidas de Erikson tienen un interés particular dado que los instrumentos de medida de corriente se ubicaron en la base de la torre, contrariamente a las medidas de Berger y Garbagnati. Las corrientes medidas poseían altos valores de tiempos de crecimiento comparados con las medidas realizadas en otros sitios [1, 5], estas diferencias podrían ser ocasionadas por fenómenos ocurridos dentro de la torre, (sección 6).

Esta primera etapa de medidas de corriente de rayos estuvo caracterizada por la utilización de torres instrumentadas de baja altura, inferior a 100m; posteriormente, fueron utilizadas torres de telecomunicaciones con mayores alturas, como los trabajos realizados en Alemania, Canadá y Suiza. Entre ellos, los estudios efectuados en la CN Tower en Toronto (figura 5), donde se realizan medidas y análisis de los parámetros de descargas atmosféricas desde hace



Número de descargas	Parámetro	Unidad	porcentaje de casos que sobrepasan el valor indicado		
			95%	50%	5%
101 135	corriente máxima primer "return stroke"	kA	14	30	80
	descarga subsecuente	kA	4.6	12	30
92 122	di/dt máximo primer "return stroke"	kA/μs	5.5	12	32
	descarga subsecuente	kA/μs	12	40	120
89 118	tiempo ascendente (2kA-pico) Primer "return stroke"	μs	1.8	5.5	18
	descarga subsecuente	μs	0.22	1.1	4.5
90 115	duración del impulso (2kA-amplitud media) primer "return stroke"	μs	30	75	200
	descarga subsecuente	μs	6.5	32	140

Tabla 1. Valores encontrados en las curvas de corriente obtenidas por Berger [6].

más de 20 años. La CN Tower, considerada como la torre de telecomunicaciones más alta del mundo con 553 metros de altura, esta equipada para la medida de la corriente de los rayos, con dos bobinas de corriente tipo Rogowski a dos alturas diferentes, 509m y 474m. [2, 7].

Por su gran altura la CN Tower fue una de las torres que facilitó la observación de fenómenos de reflexión en la corriente del rayo; estos fenómenos son producidos por el cambio de impedancia que debe soportar la corriente en su camino hacia o desde la tierra. La figura 6, presenta una curva típica de corriente correspondiente al octavo "return stroke" de una descarga negativa medida en la CN Tower. El valor máximo de la corriente presentado en la figura 6, no corresponde, aparentemente, al valor máximo total de la corriente, esta divergencia es explicada en la sección 6.

En Colombia desde 1998, cerca a Samaná, parte central del país, se construyó una torre instrumentada de 30m de altura, a 1000m sobre el nivel del mar, por el grupo de H.Torres, para la captura de la corriente del rayo. Esta torre esta instrumentada con cuatro tipos de medidores de corriente: dos bobinas tipo Rogowski, una diferencial y otra autointegradora, una resistencia tipo shunt y un transformador de corriente; los tres sistemas de medida fueron instalados juntos cerca a la base de la torre [9, 10].

De las curvas medidas se extraen parámetros como los presentados en la tabla 1, y adicionalmente suelen encontrarse otras medidas como, el tiempo que toma la corriente del "return stroke" en llegar y descender a la mitad de su valor máximo (Full Width at Half Magnitude, FWHM), la duración del frente de onda y la variación de la corriente con el tiempo (di/dt) obtenidos

entre el 10%-90% y el 30%-90% del valor máximo [11]. Entidades como la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) y la CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Électriques), han establecido estándares de estas características asociadas con la corriente de la descarga, basados en las medidas desarrolladas por Berger et al.[6], que son utilizados en la calibración de protecciones. No obstante, las medidas reportadas por Berger et al., no consideraban las modificaciones en la forma de onda de la corriente de la descarga aportadas por la torre en la cual fueron medidas. Ello implica que dichos parámetros deberían ser actualizados, como fue sugerido por Janischewskyj et al.[2].

5. Proceso de medida de la corriente del rayo en una torre instrumentada

En general, los sistemas de medida directa de corriente de descargas atmosféricas utilizados en torres instrumentadas se componen de tres partes: la captura, la transmisión y el almacenamiento de la medida de la señal de corriente del rayo.

La captura de la señal

Por captura de la señal de corriente del rayo se entiende la creación de una copia a escala de la forma de onda de la corriente del rayo, procurando que sea lo más cercana a la original, con unidades de medida que puedan fácilmente ser transportadas y almacenadas.

Dos tipos de sistemas se utilizan normalmente para la medida directa de la corriente de una descarga atmosférica; el primero utiliza resistencias de relativo bajo valor óhmico y de alta precisión, denominadas tipo shunt, conectadas en serie al camino establecido para la conducción de la corriente del rayo hacia la tierra; mientras que el segundo sistema emplea una

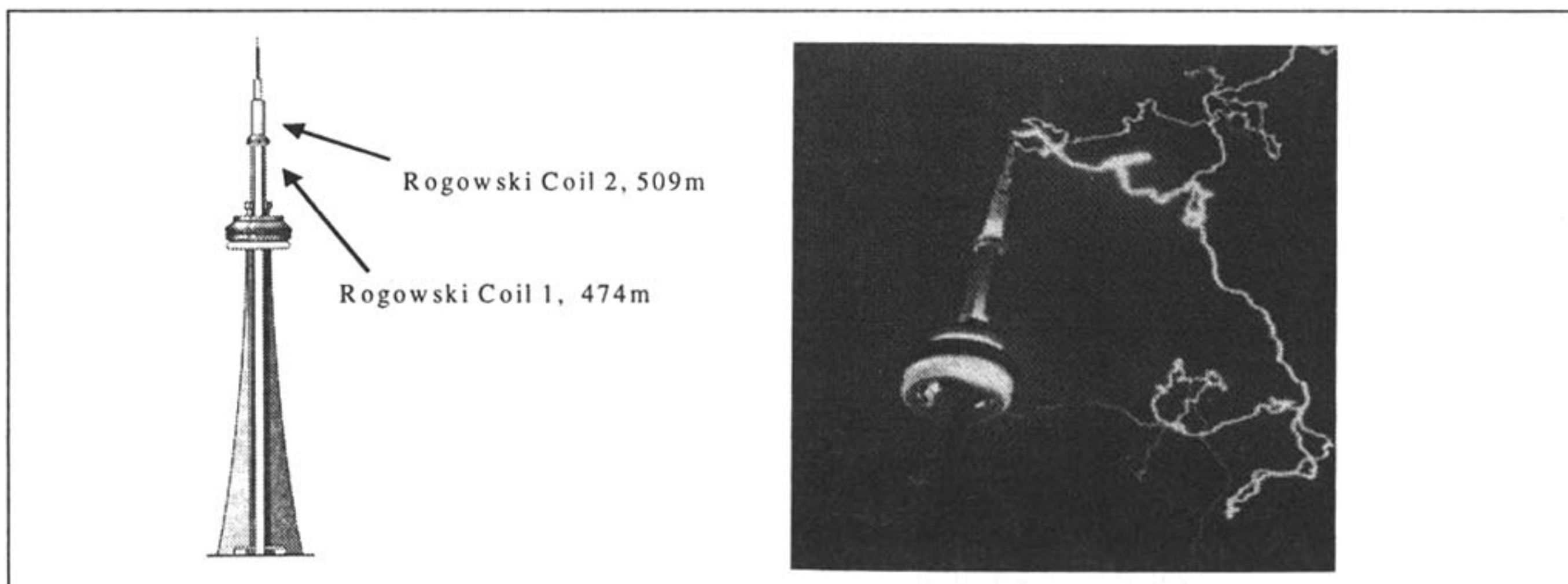


Figura 5. CN Tower en Toronto, Canadá, utilizada para la observación y medida de descargas atmosféricas desde 1976. Izquierda, posición de las dos bobinas de corriente, cortesía de "CN Tower Lightning Studies Group", Toronto. Derecha, CN Tower recibiendo una descarga atmosférica [8]

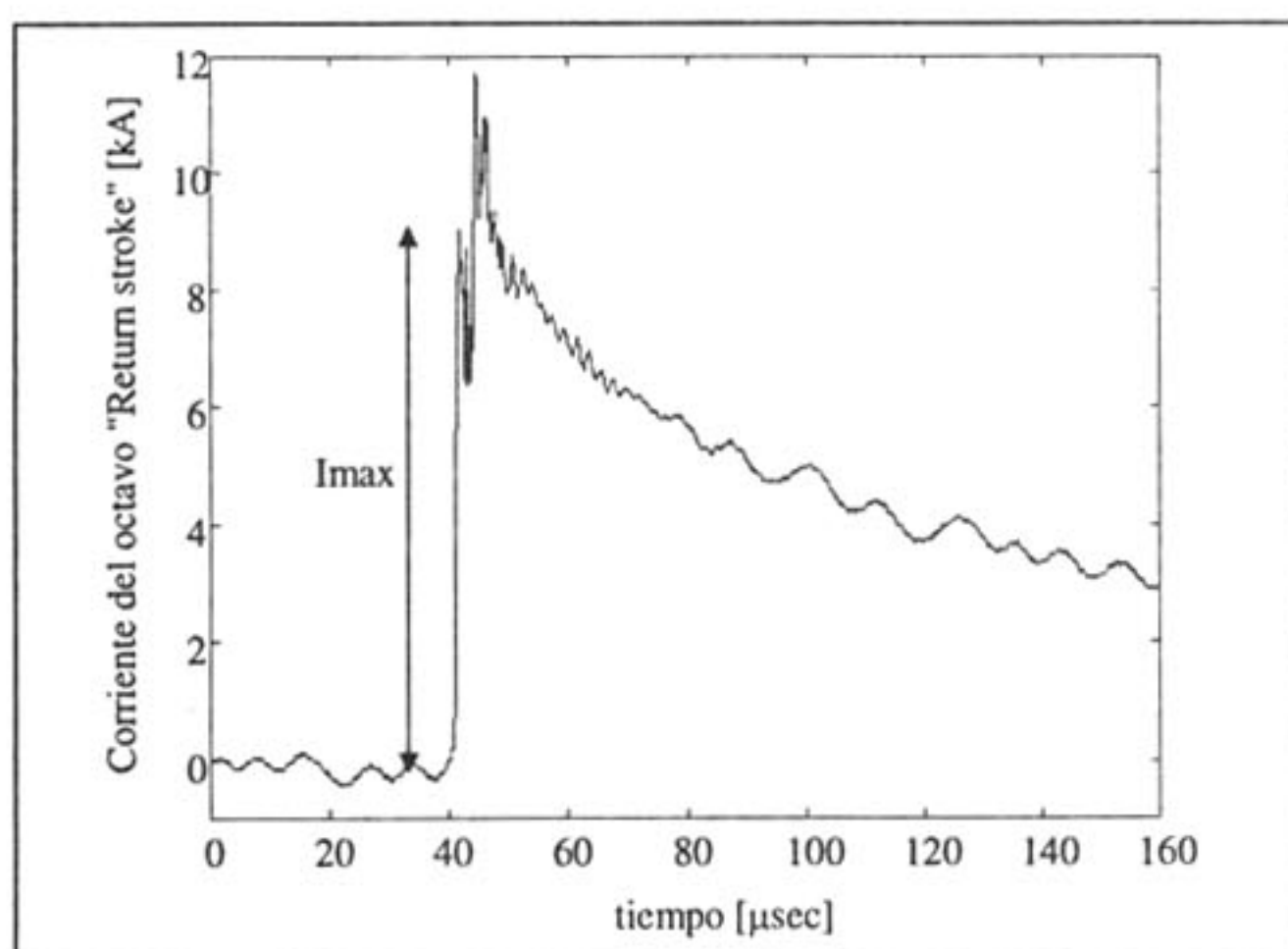


Figura 6. Forma de onda de un "return stroke" de corriente medida en la CN Tower en Agosto 2000. Cortesía del "CN Tower Lightning Studies Group" en Toronto, Canada.

bobina o transformador de corriente, conectado alrededor del conductor por el cual circula la corriente del rayo; el tipo de bobina más habitual es la bobina Rogowski, en la cual el voltaje inducido es proporcional a la variación temporal de la corriente [12, 13]. En las torres de estructuras con múltiples brazos, suele medirse la corriente en uno de los brazos asumiendo una distribución uniforme de la corriente a través de todos los brazos; la corriente total es, en consecuencia, el producto de la corriente medida y el número de brazos en la estructura de la torre.

5. LA TRANSMISIÓN

Debido a los altos valores de corriente alcanzados en el momento de la descarga atmosférica, los elementos de captura de corriente deben ser localizados a una distancia de seguridad apropiada (varios metros o

decenas de metros); por lo cual, es necesario transportar la señal de corriente capturada utilizando sistemas que no modifiquen sus características físicas, como la forma y el valor máximo de la corriente. Normalmente se utilizan cables coaxiales o triaxiales adaptados óhmicamente al sistema de captura y al sistema de recepción, que conducen la señal hasta el sistema de almacenamiento sin introducir mayores modificaciones. Actualmente, estos sistemas de transmisión por cables están siendo reemplazados por sistemas que utilizan transmisión por fibra óptica, los cuales poseen menores pérdidas y no son, teóricamente, perturbados por campos electromagnéticos. La transmisión por fibra óptica requiere, sin embargo, de sistemas activos (fuente externa de energía) en ambas extremidades de la fibra para la conversión de la señal eléctrica en señal óptica, los cuales deben aislarse y protegerse correctamente pues representan un punto sensible en el sistema.

5.1 EL ALMACENAMIENTO

Los sistemas de recepción de la corriente del rayo (controladores) reciben normalmente una señal analógica que debe ser almacenada eficientemente para obtener una fiel copia de todas las características de la onda original. El convertidor analógico-digital, uno de las piezas claves del controlador, debe seleccionarse con base en dos parámetros: la resolución temporal y la resolución vertical. La resolución temporal está relacionada con el máximo valor en frecuencia que contiene la señal de corriente del rayo, dado que una mala resolución temporal implica pérdida de componentes de alta frecuencia y por consecuencia de definición en la forma de onda de la corriente. De la misma forma, la resolución vertical influye directamente en la calidad de la forma de onda a almacenar, una

buena resolución vertical mejora la definición de los cambios ocurridos en la señal.

Igualmente, los valores de resolución temporal y vertical deben seleccionarse teniendo en cuenta las limitaciones impuestas por el equipo utilizado, limitaciones de máxima frecuencia y de capacidad de almacenamiento o memoria del controlador. El almacenamiento de la señal de corriente del rayo, compuesta por alrededor 20 descargas atmosféricas o "return strokes" de duraciones de aproximadamente una centena de microsegundos y separadas en tiempos por milisegundos, implica una alta resolución temporal y vertical para observar los detalles en la forma de corriente de los "return strokes" y una gran memoria que pueda capturar el mayor número de descargas del mismo rayo. Las exigencias de memoria ocasionadas por el gran tamaño temporal del rayo han sido resueltas mediante el uso de sistemas con memoria repartida o segmentada a nivel del controlador con la cual se pueden definir períodos de tiempo precisos de alta resolución de la señal a almacenar y dejar los intervalos entre "return strokes" sin almacenar. El tiempo entre los "return strokes" es almacenado en memorias alternas en el controlador, lo cual permite reconstruir en su totalidad la forma de onda de la corriente del rayo, por supuesto, con secciones en blanco entre las descargas. Por ejemplo, en el sistema utilizado por la CN Tower, en Canadá, se memorizan hasta 8 "return strokes" para cada señal de rayo; cada "return stroke" es digitalizado con una resolución temporal (Δt) de 10 nanosegundos, una resolución vertical de 10 bits y una duración de 160 microsegundos por "return stroke"; la máxima frecuencia que puede ser almacenada por este sistema para cada "return stroke" corresponde a $f_{\max} = 1/2 \Delta f = 50$ MHz, y la resolución vertical de 10 bits corresponde a $2^{10} = 1024$ niveles con los cuales la señal de corriente puede ser subdividida para conservar su forma; la figura 6, presenta una forma de onda de corriente de "return stroke" capturada por este sistema [2].

Resumiendo, podemos decir que en los procesos de captura, transmisión y almacenamiento de la corriente son de especial importancia los siguientes aspectos: una adecuada adaptación del camino seguido desde el sitio de medida de la señal hasta el lugar de almacenamiento, apropiada resolución vertical y temporal del controlador, conveniente límite de frecuencia y de amplitud de cada instrumento involucrado. A pesar de todos los cuidados que normalmente se tienen, hay efectos inevitables que producen pérdida de información, como aquellos debidos a acoplamientos indirectos con otros sistemas en la torre, defectos en las conexiones, atenuación de la señal transportada; todas estas modificaciones que sufre la copia de la señal de corriente en el proceso de almacenamiento se denomina "distorsión propia del

sistema de adquisición". El factor de distorsión asociado al sistema de adquisición es un valor que se obtiene en el momento de calibración del sistema y que es corregido en las señales adquiridas en el momento de la visualización de la corriente.

6. EFECTOS DE LA TORRE INSTRUMENTADA EN LA CORRIENTE DEL RAYO

El factor de "distorsión propio del sistema de adquisición", es un factor medido en el momento de calibración del sistema y posteriormente corregido en las señales de corriente del rayo. Sin embargo, la torre misma representa un circuito eléctrico que puede modificar la corriente del rayo en el momento de la conexión final hacia la tierra. La torre posee una impedancia característica diferente a la impedancia del sistema de conexión a tierra y posiblemente diferente a la impedancia característica representada por el circuito de conducción de la descarga hasta la torre. Estos cambios de impedancia originan reflexiones en la onda de corriente desde el primer momento de conexión con la torre y posteriormente cuando la señal propagada en la torre llega al nivel de la tierra. Estas reflexiones múltiples se adicionan a la onda de corriente modificando la forma de onda inicial, y por consecuencia los parámetros asociados con ella. Mayores reflexiones dentro de la torre pueden ocurrir cuando están compuestas por secciones de estructura diferente, en las cuales el valor de la impedancia característica cambia a lo largo de la torre. La figura 7, presenta una ampliación de la onda de corriente presentada en la figura 6, en la cual se observa una señal de corriente original y un tiempo después, una reflexión de corriente que se suma a ella; la cual, gracias a la gran altura de la CN Tower, es posible de observar y corresponde a la primera reflexión proveniente de la base de la torre. Esta forma de onda es diferente a la presentada por Berger (figura 4) en la cual las reflexiones producidas por la torre están ocultas dentro de la señal original. De acuerdo con Uman [5], la forma de onda de la corriente medida en torres puede ser diferente a aquella que se produciría en descargas directas a tierra debido principalmente a la aparición del "streamer" desde la torre hacia el canal del líder, y a la influencia del circuito eléctrico representado por la torre misma. Guerrieri et al. [1], adicionaron a la definición de Uman que los cambios aportados por las torres modifican igualmente el valor máximo de la corriente del rayo incluso en torres de baja altura, como la utilizada por Berger. Ellos introdujeron un método denominado de "descontaminación" para un modelo simplificado de torre en la cual existen dos puntos de discontinuidad óhmica, uno en la cima y el otro en la base de la torre, figura 8.

En la figura 8, P_i y P_g representan los coeficientes de

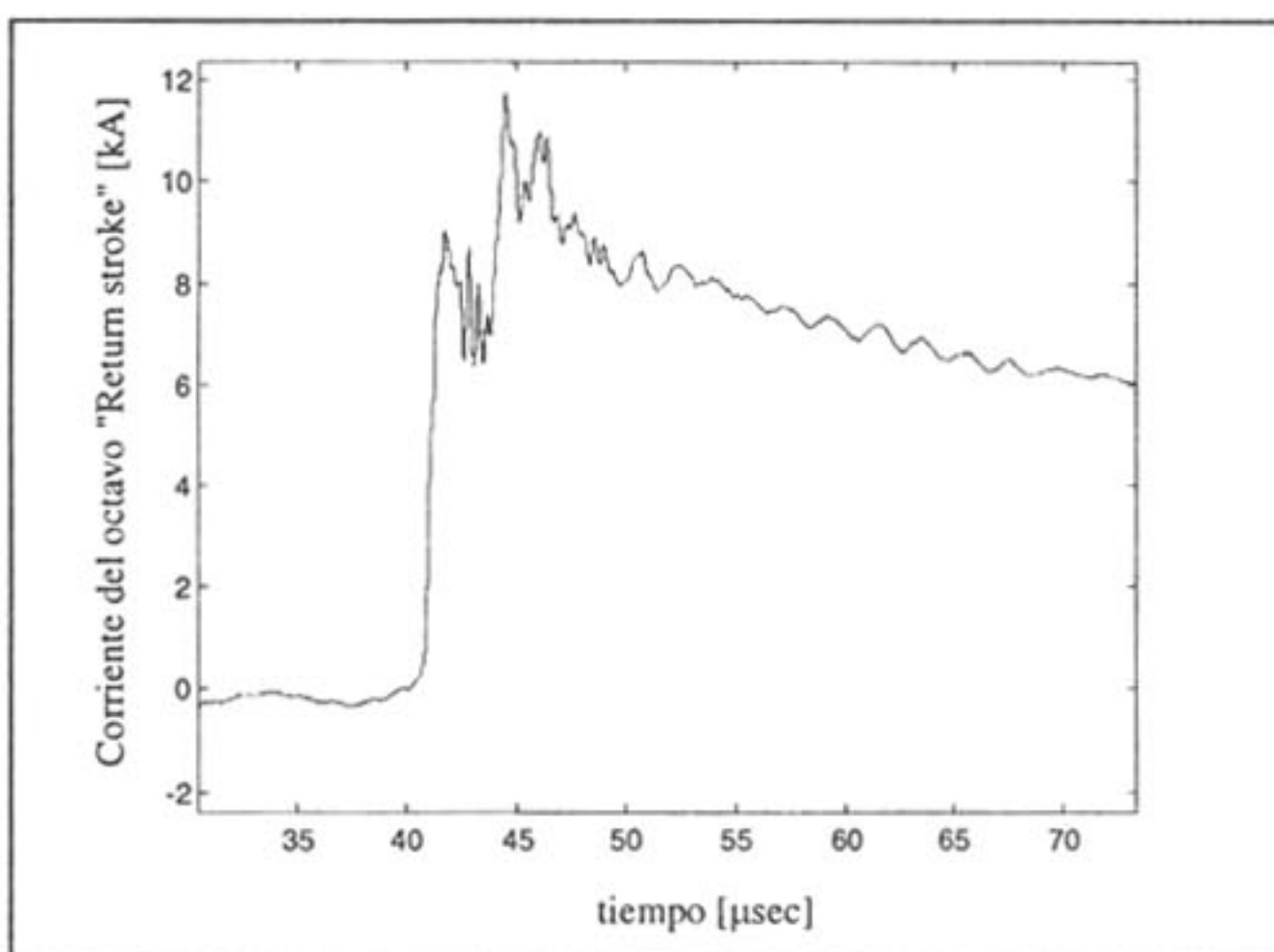


Figura 7. Ampliación de la corriente de la figura 2, que evidencia la presencia de reflexiones producidas dentro de la torre

reflexión en la cima y en la base de la torre, h es la altura de la torre e $i_o(t)$ es la corriente original de la descarga atmosférica sin la contaminación introducida por la torre.

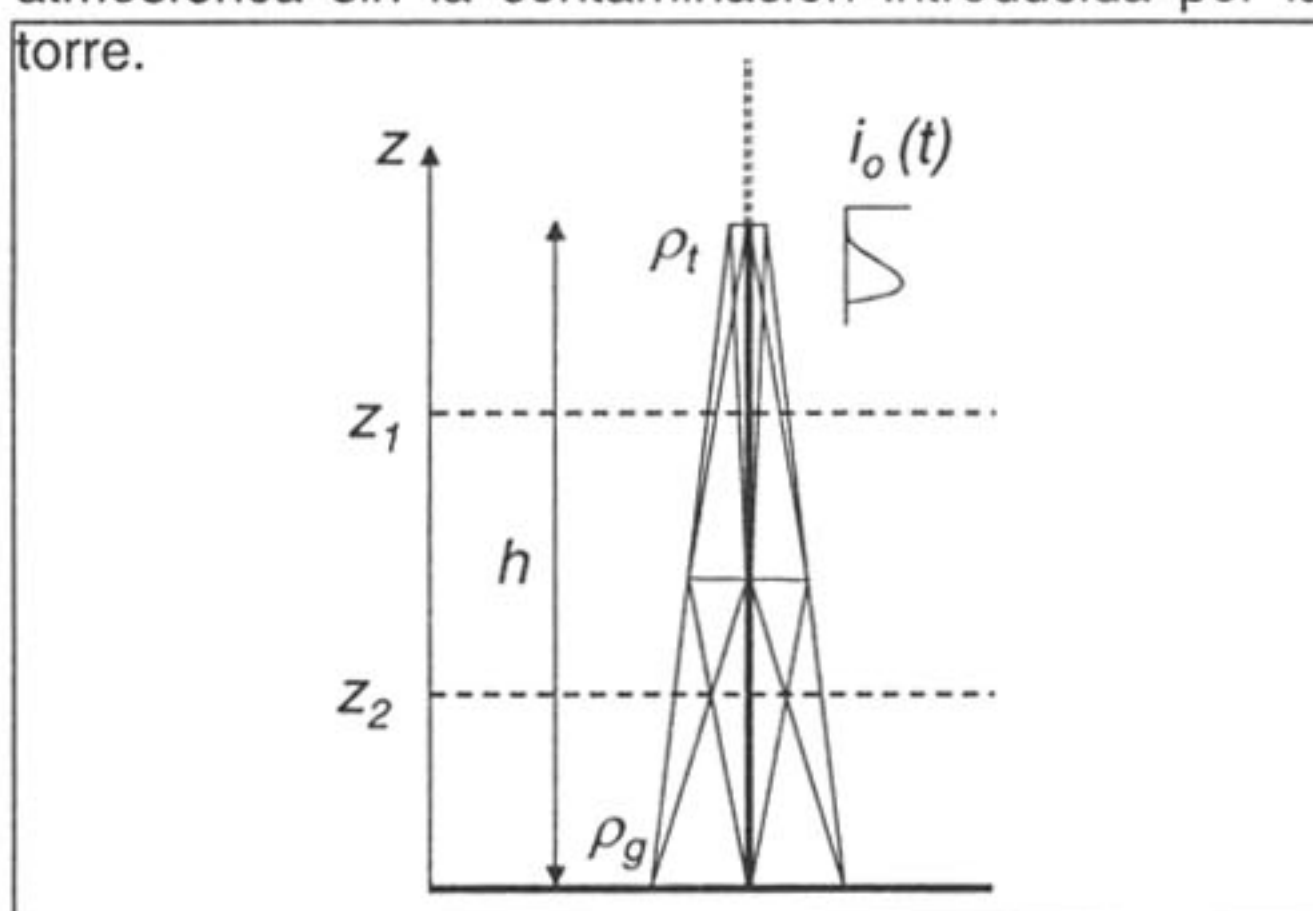


Figura 8. Modelo de torre utilizada por Guerrieri et al. [1]

El método de descontaminación sugiere, a partir de valores conocidos de los coeficientes de reflexión en la torre P_t y P_g eliminar las modificaciones aportadas por estas reflexiones y obtener la corriente original, descontaminada, que debería circular a través de la torre en el caso de un acoplamiento ideal entre las partes (canal, torre y conexión a tierra). Este método implica una suma infinita de las reflexiones en la torre para un resultado preciso.

Los coeficientes de reflexión, considerados por Guerrieri et al., se definieron como constantes e independientes de la frecuencia; Bermúdez et al. [3], desarrollaron un análisis en el dominio de la frecuencia de la corriente contaminada, permitiendo que los coeficientes de reflexión P_t y P_g fueran dependientes de la frecuencia, y encontraron una expresión cerrada que incluía todas las reflexiones de la corriente en la torre (sin la suma infinita) que facilita su determinación; propusieron

igualmente un método para encontrar el valor de los coeficientes de reflexión, definidos en la figura 3, a partir de dos medidas de corriente simultáneas en la torre, para la posterior descontaminación de la corriente. La dependencia de la frecuencia de los coeficientes de reflexión, P_t y P_g fue puesta en evidencia por Janischewskyj et al. [2], quienes en observaciones de corrientes medidas en la CN Tower obtuvieron diferentes valores para dichos coeficientes en función de la duración del frente de onda.

7. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

La medida de la corriente de una descarga atmosférica es quizás la componente del rayo que más ha sido estudiada por los efectos producidos por impactos directos en sistemas eléctricos y edificaciones, y por las relaciones establecidas a partir de ella con otros componentes del rayo. Un gran número de medidas de corriente de rayos fue obtenido en los años 60 y 70 en torres instrumentadas con alturas inferiores a 100 metros, las cuales sirvieron de base para la formación de estadísticas de rayos. No obstante, gracias a las medidas de corriente efectuadas en torres de gran altura, se observó que la torre modifica la forma de onda de la corriente del rayo, por las múltiples reflexiones que ocurren dentro de ella, lo cual sugiere que las estadísticas que ya han sido establecidas deben ser evaluadas nuevamente. De igual forma, los sistemas de detección de rayos que fueron diseñados mediante señales de campo electromagnético producido por la corriente de descargas en torres, deberán ser de nuevo analizados para incluir los cambios ocasionados por los efectos de la torre en la cual fue medida la corriente. Las mismas consideraciones deben aplicarse a las ecuaciones que relacionan los campos electromagnéticos con las corrientes de "return stroke" para incluir en dichos modelos los efectos de la corriente que se refleja permanente en torres no adaptadas.

En general, en este artículo se realizó una descripción de los sistemas de medida de corriente de los rayos; una introducción cronológica de los principales sistemas de torres instrumentadas construidos en distintas partes del mundo; una descripción detallada de las partes que componen estos sistemas; y un análisis de las modificaciones introducidas a la forma de onda de la corriente de la descarga por reflexiones que aparecen en la torre instrumentada. En la actualidad las modificaciones que aporta la torre a la forma de onda de la corriente del rayo están siendo evaluadas y suprimidas mediante modelos teóricos de propagación de ondas, en los cuales la torre es considerada como una línea de transmisión ideal, estos modelos requieren de una validación experimental antes de ser extendidos a la corrección de las señales de campos

electromagnéticos asociados con la descarga. Las torres con múltiples secciones pueden generar mayor número de reflexiones en su estructura, estas modificaciones deberán igualmente tenerse en cuenta en los futuros modelos de descontaminación de la corriente.

8. AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar sus agradecimientos al grupo de investigación de descargas atmosféricas de la CN Tower en Canadá, por la documentación y las señales de corriente suministradas para este artículo. A los Doctores Farhad Rachidi y Marcos Rubinstein por las recomendaciones aportadas al contenido del mismo y a los estudiantes de doctorado Carlos Andres Peña y Adona Omaira Oviedo por sus contribuciones en la redacción del documento. Al Fondo Nacional Suizo de Investigación Científica (Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique) por financiar mi investigación en este campo.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1.] S. Guerrieri, C. A. Nucci, F. Rachidi, and M. Rubinstein, "On the influence of elevated strike objects on directly measured and indirectly estimated lightning currents," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, pp. 1543-55, 1998.
- [2.] W. Janischewskyj, V. Shostak, J. Barratt, A. M. Hussein, I. Rusan, and J. S. Chang, "Collection and use of lightning return stroke parameters taking into account characteristics of the struck object," presented at 23rd International conference on lightning protection, Florence, Italy, 1996.
- [3.] J. L. Bermudez, M. Rubinstein, F. Rachidi, and M. Paolone, "A Method to Find the Reflection Coefficients at the Top and Bottom of Elevated Strike Objects from Measured Lightning Currents", accepted to be presented at EMC Zurich 2001, 2001.
- [4.] G. Diendorfer, "Effect of an elevated strike object on the lightning electromagnetic fields," presented at Proceedings of the 9th Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility, Zurich, Switzerland, 1991.
- [5.] M. A. Uman, *The lightning discharge*, vol. 39. Florida: Academic Press, Inc., 1987.
- [6.] K. Berger, R. B. Anderson, and H. Kroninger, "Parameters of Lightning Flashes," *Electra*, vol. 41, 1975.
- [7.] G. Tkaczyk, W. Janischewskyj, A. M. Hussein, and J. S. Chang, "Statistical analysis of lightning strike propagation within the Canadian National Tower," presented at Cage Club 1999, Toronto, 1999.
- [8.] CN-Tower Corporation, "Lightning Facts", Visited: September 2000, http://www.cntower.ca/faqs/l3_faq_coolstuff_lightning.htm
- [9.] H. Torres, O. Trujillo, F. Amortegui, F. Herrera, G. Pinzon, C. Quintana, D. Gonzalez, D. Rondon, M. Salgado, and D. Avila, "Experimental station to measure directly lightning parameters in tropical zone," *Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering*, vol. 467, 1999.
- [10.] H. Torres, "Experimental station «Ilyapa» to measure directly lightning parameters in tropical zone", Visited: September 2000, <http://www.paas.unal.edu.co/investigacion/estacion.htm>
- [11.] I. Rusan, "CN Tower lightning parameters," in *Electrical and Computer Engineering*. Toronto: University of Toronto, 1996.
- [12.] P. Dzurevych, "Measurement and analysis of lightning strokes to the CN Tower in Toronto," in *Electrical and Computer Engineering*. Toronto: University of Toronto, 1993.
- [13.] R. H. Golde, *Lightning*, vol. 1. London: Academic Press, 1977. ■

AUTOR



José Luis Bermúdez Arboleda, nació en Zarzal (Valle), Colombia, en 1970. Obtuvo su diploma de ingeniero electricista y de máster en generación de energía eléctrica, en la Universidad del Valle, Cali, Colombia, en 1992 y 1996 respectivamente. En la

actualidad realiza estudios de doctorado en el laboratorio de redes de energía eléctrica del departamento de electricidad de la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL), Suiza.

Sus áreas de investigación son las descargas atmosféricas, los sistemas de acoplamiento magnético y la compatibilidad electromagnética. Autor y coautor de mas de 10 artículos científicos publicados y presentados en conferencias y revistas internacionales. LRE-DE-EPFL, Ecublens, CH-1015, Lausanne, Suiza. Jose-Luis.Bermudez@epfl.ch