



PIANTINI, Alexandre; JANISZEWSKI, Jorge J.M. Efectos de las ramificaciones y de los edificios em los voltajes inducidos por rayos em líneas de distribución urbanas. **Información Tecnológica**, v.15,n.6, p. 51-58, 2004.

Efectos de las Ramificaciones y de los Edificios en los Voltajes Inducidos por Rayos en Líneas de Distribución Urbanas

The Effects of Line Laterals and Nearby Buildings on Lightning-Induced Voltages in Urban Distribution Lines.

A. Piantini y J.M. Janiszewski

Univ. de Sao Paulo, Esc. Politécnica, Inst. de Electrotecnia y Energía,
Av. Prof. Luciano Gualberto N°1289, 05508-010 Sao Paulo, SP-Brasil (e-mail: piantini@iee.usp.br)

Resumen

Se presentan algunos resultados experimentales, de los efectos de las ramificaciones y de los edificios cercanos, en los voltajes inducidos por rayos en líneas de distribución urbanas. Usando un modelo en escala reducida de 1:50, las pruebas fueron realizadas considerando una típica configuración de línea de distribución, incluyendo la simulación del conductor neutral, ramificaciones, edificios y equipos como los pararrayos y transformadores. Se presentan comparaciones entre voltajes inducidos en los terminales de alto voltaje del transformador para diferentes alturas de los edificios y situaciones del transformador. Los resultados muestran que en algunas circunstancias las ramificaciones y la presencia de estructuras cercanas a la línea pueden afectar significativamente los voltajes inducidos por descargas atmosféricas.

Abstract

Some experimental results are presented from research on the effects of laterals and nearby buildings on the lightning-induced voltages in urban overhead distribution lines. By making use of a 1:50 scale model, tests were performed considering a typical distribution line configuration, including the simulation of the neutral conductor, laterals, buildings, and equipment such as arresters and transformers. Comparisons between voltages induced at the HV transformer terminals are presented for different building heights and transformer locations. The results show that in some circumstances the laterals and the presence of structures close to the lines may significantly affect the induced voltages.

Keywords: *lightning induced voltages, urban distribution lines, scale model, surge arresters*

INTRODUCCIÓN

La importancia del estudio de las características de los voltajes inducidos por rayos, en las líneas urbanas, está básicamente relacionada a dos aspectos: el gran número de fallas del transformador atribuidos a las descargas atmosféricas ([Darveniza, 2001](#); [Parrish, 1991](#)) y el hecho que en las áreas urbanas la presencia de estructuras altas cercanas a la línea limita su exposición a descargas directas.

Una línea urbana se caracteriza, además de la presencia de estructuras y edificios a su alrededor, por muchas ramificaciones y por una alta densidad de transformadores y pararrayos. Estas características aumentan la complejidad del fenómeno y traen muchas dificultades al cálculo de voltajes inducidos. Aunque la adecuación de los modelos de acoplamiento "*Extended Rusck Model*" - ERM ([Piantini, 1997](#); [Piantini y Janiszewski, 1998](#); [2003](#)) y de Agrawal et al. ([1980](#)) para cálculos de voltajes inducidos por el rayo en las líneas de geometría compleja, ya se ha demostrado en las comparaciones entre los resultados teóricos y experimentales ([Piantini, 1997](#); [Nucci et al, 1998](#)), sólo existen algunos esfuerzos han sido realizados para investigar la influencia de las ramificaciones y de los edificios cerca de la línea ([Piantini, 1998](#); [Piantini y Janiszewski, 2000](#); [Yamamoto et al, 2001](#)).

La conexión de una ramificación al alimentador principal representa un punto de discontinuidad en la línea, mientras que la presencia de edificios cercanos cambia el campo electromagnético alrededor de él. Como consecuencia, los voltajes inducidos son afectados. Para evaluar estos efectos, se utilizó un modelo en escala reducida 1:50.

Las simulaciones consideraron un típico centro urbano con una línea de distribución de tres fases, ramificada y con un conductor neutro. Los transformadores y pararrayos también fueron modelados. Fueron investigadas diferentes configuraciones de la línea y los voltajes fueron medidos en un modelo del transformador, situado en el alimentador principal o en una ramificación. Los edificios fueron representados por cajas de aluminio conectadas a la tierra con las alturas de 5 o 15 m (referidas al sistema real).

Se realizaron varias pruebas en diferentes condiciones y los resultados obtenidos permitirán una investigación de las características de los voltajes inducidos por el rayo en las líneas urbanas, tomando en cuenta el efecto de las ramificaciones y la presencia de edificios a su alrededor.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Las características principales del modelo de escala 1:50, ya fueron descritas anteriormente ([Piantini y Janiszewski, 2000](#)). A lo largo de este artículo, a menos que sea indicado, todos los valores de los parámetros son referenciados al sistema real. En la simulación, la línea de distribución tiene una longitud de 1,4 km, cuatro conductores y una configuración horizontal. La distancia entre las fases externas era de 1,5 m y las alturas de los conductores eran de 10 (fases) y 8 m (neutro). Todos los diámetros de los conductores eran de 2 cm.

El neutral se conectó a la tierra a cada transformador y también al medio de las ramificaciones a través de resistencias a tierra, con $R = 50 \text{ W}$, salvo en el punto de la medición, donde $R = 0 \text{ W}$. La

longitud del modelo de canal de retorno del rayo (r.s.m.) fue de 600 m y su impedancia era de aproximadamente 2,2 kW. La corriente al nivel de la tierra (con magnitud I) podría aproximarse como una forma de onda triangular con tiempo de frente $t_f = 2$ ms y tiempo de valor medio de 85 ms. Su velocidad de propagación a lo largo del r.s.m. era de aproximadamente 11 % de la luz en el espacio libre. La tierra se representó por un plato de aluminio cubriendo un área de 1400 x 450 m². Las simulaciones de la impedancia de entrada de los transformadores se hicieron por medio de condensadores de 10 pF (0,5 nF en el sistema real), salvo en el punto de la medición donde la capacitancia de la prueba de voltaje (0,65 nF en el sistema real) fue considerada.

Los pararrayos fueron representados por un circuito con diodos y resistencias ([Piantini, 1997](#)) cuya curva V_{xl} (voltajes residuales versus corriente impulsiva 8x20 ms) se muestra en la [Figura 1](#), junto con las curvas típicas de pararrayos reales de SiC y de ZnO. En la [Figura 1](#), los valores relacionados al modelo se envían al sistema real pero aplicando el factor de escala para los voltajes y corrientes (1: 18000). Se usaron cajas de aluminio de la misma altura conectadas a la tierra para la simulación de edificios (con alturas, $h_e = 5$ m y 15 m, dependiendo de la configuración de la prueba), como se muestra en la [Figura 2](#).

Después de la implementación del modelo, se realizaron varias pruebas para investigar la influencia en los voltajes inducidos por la altura de los edificios, distancia entre el punto de medición y la lateral más cercana, amplitud de la corriente del rayo, distancia entre los pararrayos y los puntos de medición. Los voltajes inducidos fase-tierra fueron medidos cerca de un transformador instalado en el alimentador principal o al final de una ramificación. Todas las medidas fueron realizadas en la fase más cercana al r.s.m. por un osciloscopio digital con una tasa de muestreo de 1 GS/s y un ancho de banda de 250 MHz.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Influencia de las ramificaciones

De acuerdo con lo descrito anteriormente, el gran número de posibilidades de configuraciones de la línea de distribución, la presencia de ramificaciones de diferentes longitudes y condiciones de terminación, etc., aumentan la complejidad del fenómeno y las dificultades en el análisis de los voltajes inducidos por rayos. Cada punto de intersección de una lateral con el alimentador principal representa una discontinuidad de la línea, ya que un suministro que llega a uno de estos puntos "ve" una impedancia que es más pequeña que la impedancia característica de la línea. La polaridad del voltaje reflejado será opuesta al incidente y el voltaje transmitido, aunque de la misma polaridad, tendrá una menor amplitud que el incidente. Por consiguiente los voltajes inducidos en los puntos de la línea cerca de una lateral tienden, en general, a alcanzar amplitudes más pequeñas que aquellas que se alcanzarían en la ausencia de una lateral. Este es el caso cuando la distancia entre la lateral y el punto bajo consideración es bastante pequeña para que el efecto de la reflexión sea "sentido" antes que el voltaje alcance su máximo.

La [Figura 3](#) presenta una configuración de prueba para evaluar la influencia de las ramificaciones. Se muestran dos líneas, ambas a una distancia $d = 70$ m del r.s.m.; la más corta, recta, una sola fase, con ambos terminales unidos, se llamó de "línea de referencia", aunque la otra, ramificada, cuatro conductores, se denominó de "línea de prueba" (LP). En esta configuración las líneas no tenían ni pararrayos ni transformadores.

Las formas de onda presentes en las [Figuras 4 y 5](#) (con los parámetros referidos al sistema real) ilustran la influencia de las ramificaciones en los voltajes inducidos fase-tierra en la línea de referencia y en la línea de prueba para condiciones diferentes acerca de la terminación de las

ramificaciones (unida o abierta) y la distancia entre el punto de medición y la ramificación más cercana. Las mediciones fueron realizadas de acuerdo a la configuración mostrada en la [Figura 3](#) y en ambos los casos $I = 46 \text{ kA}$, $t_f = 2 \text{ ms}$, $d = 70 \text{ m}$ y $R = 50 \text{ W}$ (excepto en los puntos de medición, donde $R = 0 \text{ W}$). Los voltajes inducidos no sólo son afectados por la presencia de las ramificaciones pero también lo son por las condiciones de sus terminaciones.

En caso de ramificaciones largas o cuando ellas son terminadas por pararrayos, los voltajes inducidos tienden a disminuir. A la menor distancia entre el punto de la medición y la lateral más cercana corresponde la mayor reducción, como se observa en la [Figura 4](#).

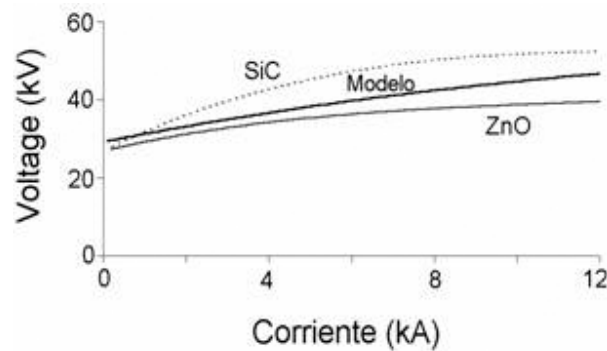


Fig. 1: Comparación entre curvas V_{xI} del modelo y de pararrayos reales de SiC y de ZnO.

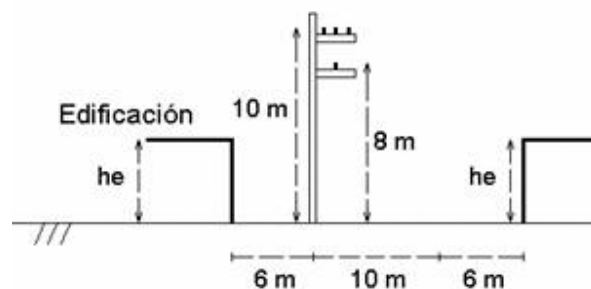


Fig. 2: Distancias entre los edificios y el alimentador principal. Altura de las edificaciones (he): 5 o 15 m.

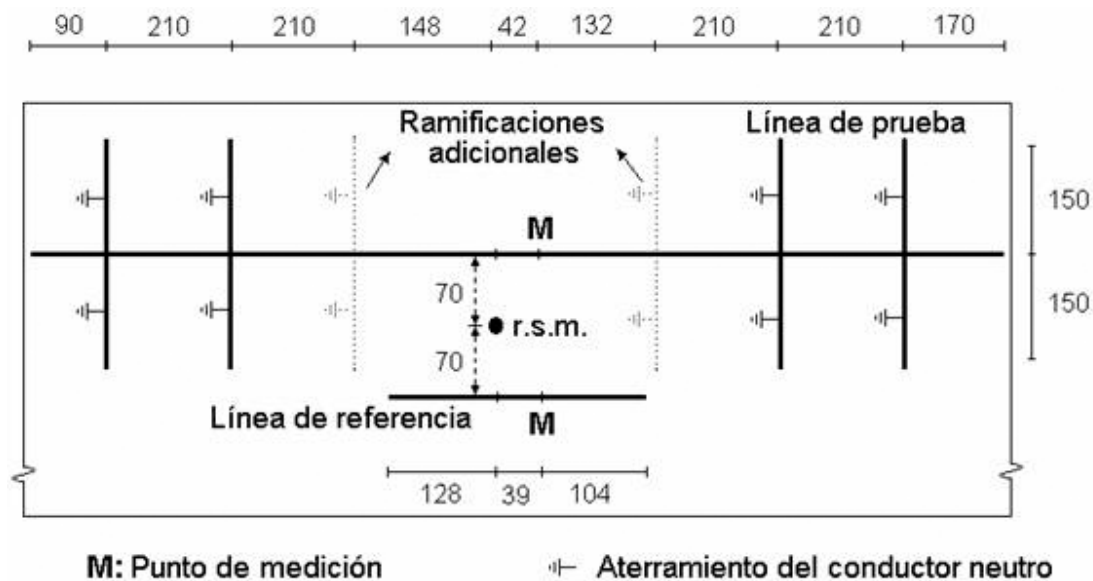


Fig. 3: Configuración de prueba para el análisis de la influencia de las ramificaciones en los voltajes inducidos. Dimensiones en metros, referidas al sistema real.

Por otro lado, si los terminales de las ramificaciones están abiertos, el voltaje inducido puede aumentar si la distancia entre el punto de la medición y la ramificación más cercana llega a ser más corta, se muestra en la [Figura 5](#).

Los voltajes que corresponden al caso de ramificaciones con los terminales abiertos tienden a ser mayores que los correspondientes a las ramificaciones con los terminales unidos; la diferencia tiende a aumentar cuando el punto bajo consideración se aproxima de una ramificación. Una diferencia de aproximadamente 30 % se observa entre las magnitudes de las curvas 3 (todos los terminales de las ramificaciones unidos - [Fig. 4](#)) y 5 (todos los terminales de las ramificaciones abiertos - [Fig. 5](#)), que corresponden a una distancia de 132 m entre el punto de medición y la ramificación más cercana.

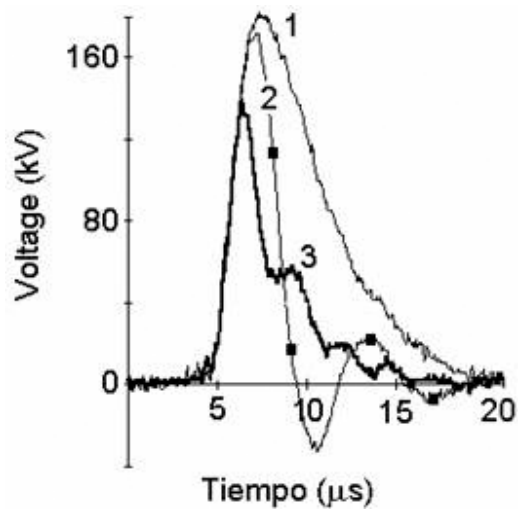


Fig. 4: Voltajes inducidos fase-tierra en la línea de prueba (LP). Todos los terminales de las ramificaciones unidos. (1) línea de referencia, (2) LP sin ramificaciones adicionales y (3) LP con ramificaciones adicionales.

Por otro lado, las curvas 2 (todos los terminales de las ramificaciones unidos - [Fig. 4](#)) y 4 (todos los terminales de las ramificaciones abiertos - [Fig. 5](#)), que corresponden a una distancia mayor entre el punto de medición y la lateral más cercana (342 m), presentan el mismo valor máximo; una diferencia significativa puede notarse, sin embargo, entre los extremos de las ondas.

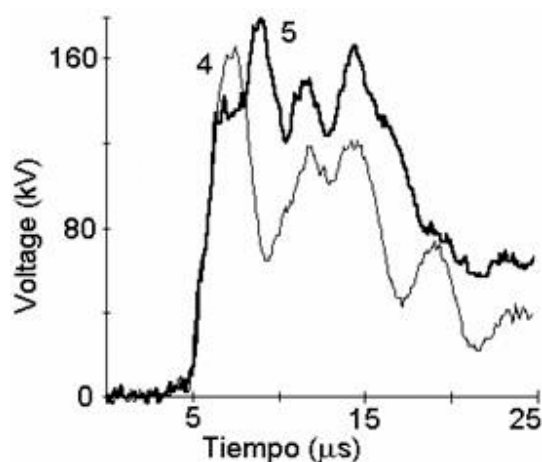


Fig. 5: Voltajes inducidos fase-tierra en la línea de prueba (LP). Todos los terminales de las ramificaciones abiertos. (4) LP sin ramificaciones adicionales y (5) LP con ramificaciones adicionales.

Influencia de los edificios

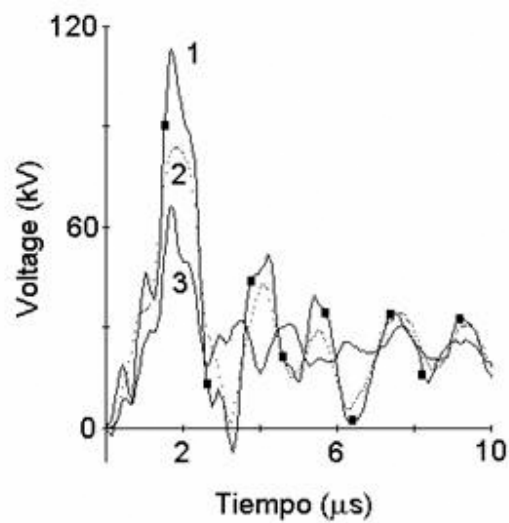
Edificios (o estructuras conductoras) afectan los campos electromagnéticos y, como consecuencia, pueden reducir los voltajes inducidos.

La [Figura 6](#) ilustra la influencia de la presencia de edificios de alturas (h_e) diferentes en los alrededores de la línea en los voltajes inducidos en el transformador del alimentador principal más cercano al punto de impacto del rayo. Los parámetros voltaje y tiempo están referidos al sistema real y los números en las curvas identifican las configuraciones 1 ($h_e = 0$ m, sin edificaciones), 2 ($h_e = 5$ m) y 3 ($h_e = 15$ m) presentadas en la [Figura 7](#). El conductor neutro fue conectado a tierra en los puntos indicados en la [Figura 7](#) y también en todos los transformadores instalados. La amplitud de corriente del rayo era de $I = 34$ kA, con tiempo de frente $t_f = 2$ ms. La distancia entre la localización del rayo (r.s.m.) y el alimentador principal era de 20 m.

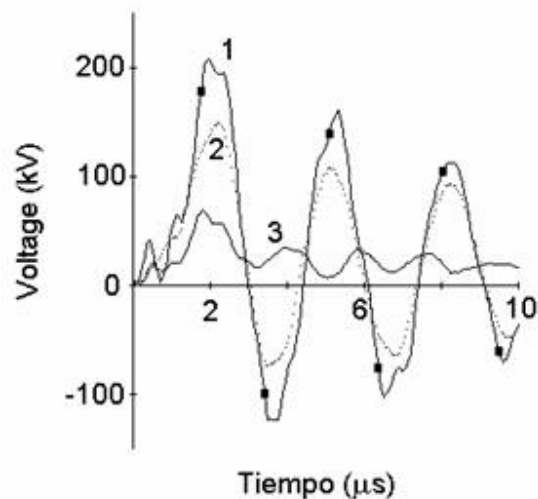
Dos situaciones fueron consideradas con respecto a las distancias s_e y s_d entre el transformador y el conjunto de pararrayos más cercano. Puede notarse muy claramente que la presencia de los edificios causa una reducción de la amplitud de los voltajes inducidos, más significativa en el caso de edificios más altos. La dependencia de la magnitud de los voltajes inducidos con respecto a s_e y s_d tiende a disminuir con el aumento de la altura de los edificios. Para ningún edificio ($h_e = 0$ m), la relación entre el valor de cresta de los voltajes inducidos en los casos 1 ($s_e = s_d = 75$ m) y 2 ($s_e = 148$ m, $s_d = 174$ m) es aproximadamente 0,54. Para $h_e = 5$ m, la proporción es 0,57, mientras que para $h_e = 15$ m la proporción es 0,96. Esto puede explicarse por el hecho que, para $h_e = 0$ m, la diferencia en los voltajes inducidos es debida solamente a las diferentes distancias entre el transformador y el conjunto de pararrayos más cercanos. Esta influencia es muy significativa, especialmente para las descargas cercanas a la línea. Por otro lado, la magnitud del campo electromagnético total cerca de la línea disminuye con el aumento

de altura de los edificios y resulta una protección más eficaz. Por consiguiente, en las condiciones de la prueba, para $h_e = 15$ m los voltajes inducidos son influenciados más por la presencia de los edificios que por la distancia entre el punto de medición y el pararrayos.

También fueron realizadas pruebas con mediciones de los voltajes inducidos cerca de un transformador colocado al final de una ramificación, considerando edificaciones con alturas $h_e = 0$ m, $h_e = 5$ m y $h_e = 15$ m. La [Figura 8](#) presenta los voltajes fase-tierra en el transformador colocado al final de la ramificación



(a)



(b)

Fig. 6: Voltajes inducidos fase-tierra para edificaciones con alturas $h_e = 0$ m (curva 1), $h_e = 5$ m (curva 2) y $h_e = 15$ m (curva 3). a) Caso 1: $s_e = 75$ m; $s_d = 75$ m; b) Caso 2: $s_e = 148$ m; $s_d = 174$ m

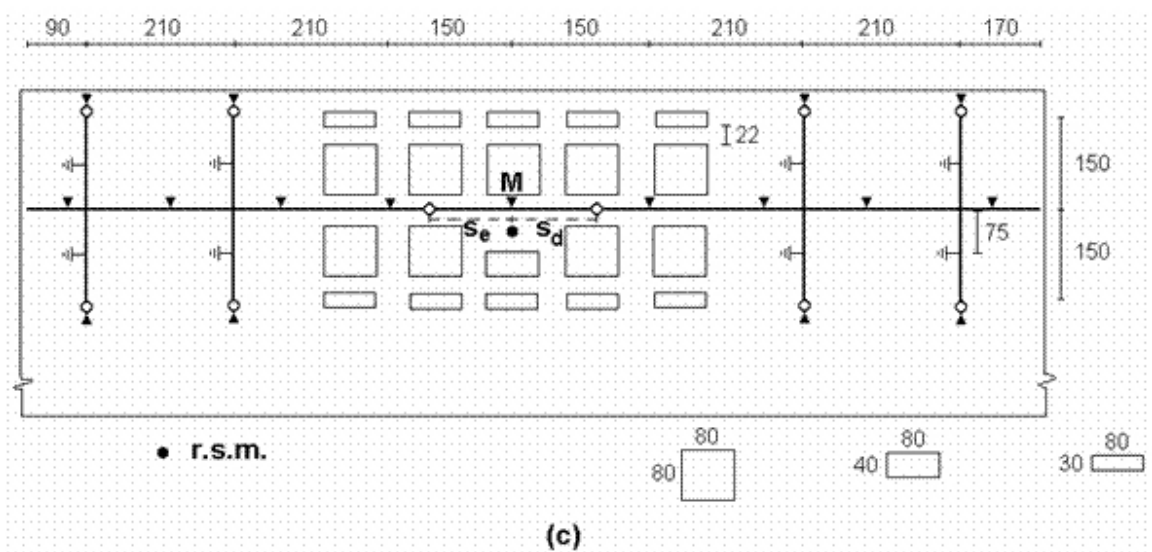
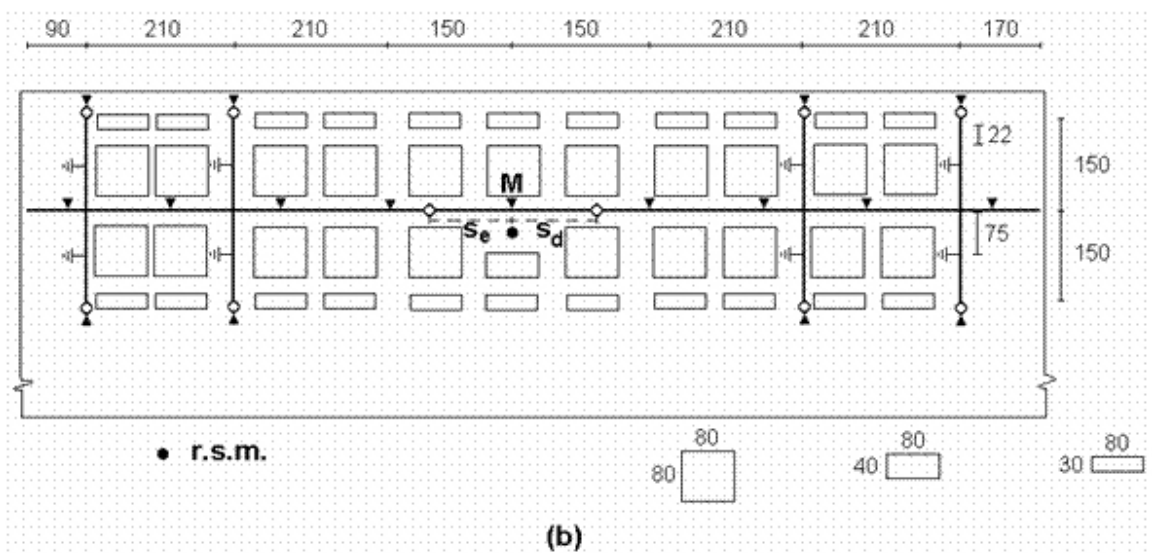
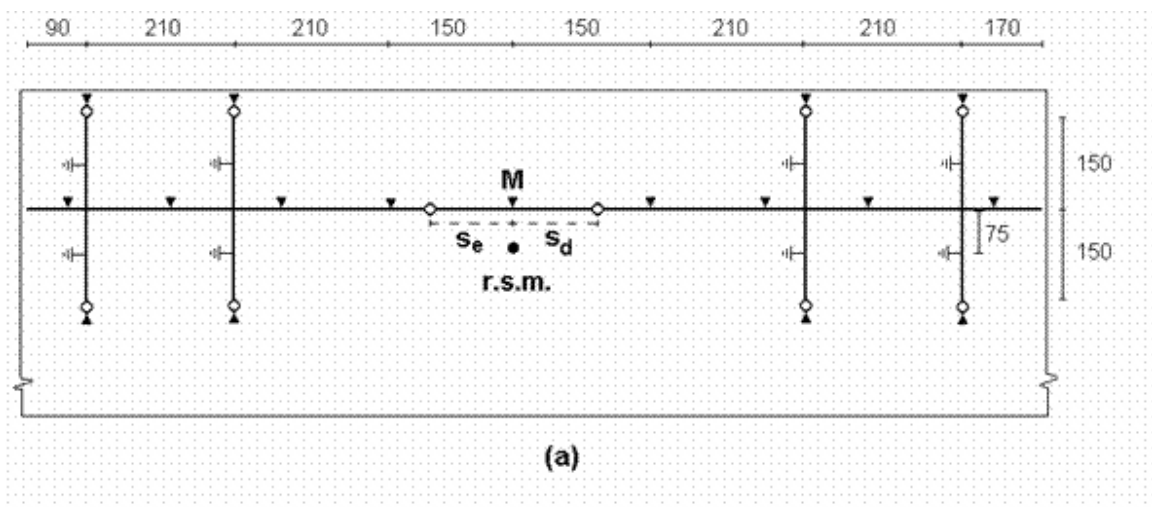


Fig. 7: Configuraciones de prueba 1, 2 y 3. Dimensiones (m), referenciadas a la escala real, M: Punto de medición; distancia entre el alimentador y r.s.m.: 20 m. Círculos: Pararrayos; Triángulos:

© **2005 Centro de Información Tecnológica**
Casilla de Correos 724
La Serena