

# Protección frente a sobretensiones de origen atmosférico en líneas de distribución subterráneas

**Este artículo presenta una mejora de la protección frente a sobretensiones de origen atmosférico en líneas de distribución subterráneas que contienen tramos de línea aérea. Se analiza el esquema de protección actual y se verifica la mejora alcanzada con el esquema propuesto mediante simulación por ordenador utilizando el programa EMTF.**

**Palabras clave:**

sobretensiones de origen atmosférico, pararrayos, redes subterráneas, entronque aéreo-subterráneo.



**A. Elices**

Instituto de Investigación Tecnológica,  
Universidad Pontificia Comillas,  
Alberto Aguilera, 23. 28015 Madrid.

**COLABORAN:**

A. Vázquez. Unión Fenosa. S.A.  
Capitán Haya, 53. 28020 Madrid.  
D. Vindel. Unión Fenosa Ingeniería, S.A.  
Orense, 81. 28020 Madrid.

**L. Rouco**



## 1. Introducción

Es frecuente el caso de líneas de distribución de media tensión (MT) subterráneas con un tramo aéreo. La protección convencional del sistema de distribución aguas abajo del entronque aéreo-subterráneo frente a sobretensiones de origen atmosférico consiste en la instalación de un juego de pararrayos en el entronque aéreo-subterráneo.

En caso de la caída de un rayo en el tramo aéreo de la línea de distribución, los transformadores MT/BT próximos al entronque aéreo-subterráneo quedan satisfactoriamente protegidos por los pararrayos mientras que el transformador situado en el extremo de la línea llega a estar sometido a sobretensión que llega a ser aproximadamente igual al doble de la tensión residual de los pararrayos dispuestos en el entronque aéreo-subterráneo. Ello es debido a que la tensión en el extremo de la línea es la suma de las ondas incidente y reflejada.

Este artículo muestra que una forma efectiva de proteger la línea de distribución subterránea es instalar un pararrayos en el extremo de la línea. En el caso de que la línea no termine en el último transformador sino que una sección de cable continúe aún aguas abajo, la protección debe incluir pararrayos en el extremo del cable subterráneo y pararrayos en el último transformador. Las limitaciones de la protec-

ción convencional y las ventajas del esquema propuesto han sido comprobadas por simulación con ordenador utilizando el programa EMTP.

Este artículo contiene otras cuatro secciones. La segunda sección detalla el modelo de la línea de distribución mixta aérea y subterránea empleado en la simulación con el programa EMTP. Las secciones tercera y cuarta presentan respectivamente los resultados de la simulación del modelo con la protección actual y con la protección propuesta. La sección quinta presenta las conclusiones del trabajo.

## 2. Modelo de una línea de distribución mixta aérea y subterránea

Este artículo considera una línea de distribución mixta aérea-subterránea de MT (ver figura 1). Una configuración típica de estas líneas es la descrita a continuación. La línea es subterránea a la salida de la su-

bestación AT/MT durante aproximadamente 100 m. A continuación, la línea tiene un tramo aéreo de aproximadamente 1 km de longitud. Después, la línea continúa como subterránea en toda su longitud alimentando un racimo de transformadores MT/BT. En los dos entronques aéreo-subterráneos se encuentran dispuestos juegos de pararrayos para proteger los cables y transformadores.

Estas líneas suelen tener un tramo de cable (normalmente en vacío) desde el último transformador hasta un centro de reflexión para que en caso de producirse una falta permanente en un tramo de la línea, el tramo restante pueda ser alimentado a través del cable de socorro (el interruptor situado en el punto B, está normalmente abierto y se cierra en caso de defecto en la línea).

Se ha considerado un modelo simplificado de la línea de distribución aérea-subterránea dado que el objetivo de este trabajo no es la determinación

exacta de las sobretensiones en los arrollamientos de MT de los transformadores MT/BT y el cable, sino la explicación de las limitaciones de la protección convencional y las cualidades de la mejora propuesta.

Se ha contemplado un circuito monofásico equivalente a la secuencia directa. Los tramos aéreo y subterráneo de la línea de distribución han sido representados por líneas de parámetros distribuidos no dependientes de la frecuencia. Los transformadores se han representado como una capacidad a tierra correspondiente a la capacidad de los arrollamientos de MT a tierra, ya que sólo son de interés las tensiones en los citados arrollamientos (no se pretende estudiar las sobretensiones transferidas a BT). La inductancia de los devanados del transformador se desprecia pues presenta una impedancia muy grande debido a que la onda de corriente del rayo tiene un frente de onda muy escarpado. Por el contrario, la impedancia de la capacidad fa-

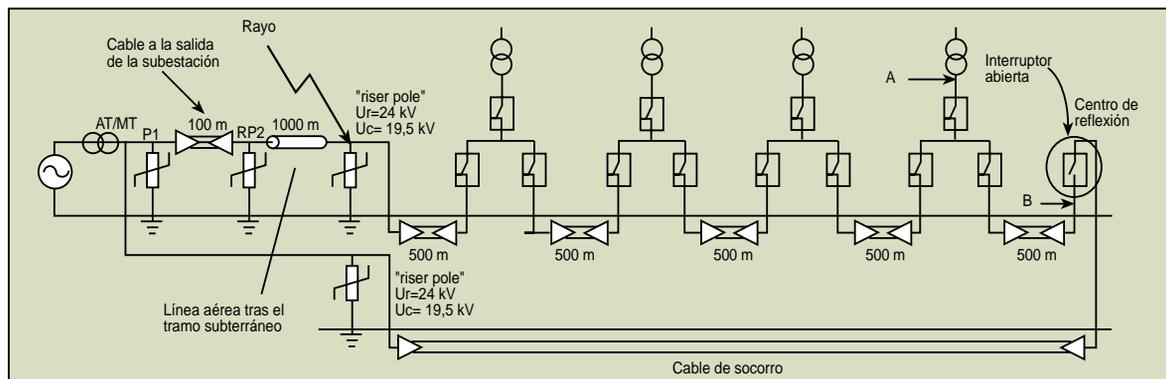


Figura 1: Esquema de una línea de distribución subterránea.

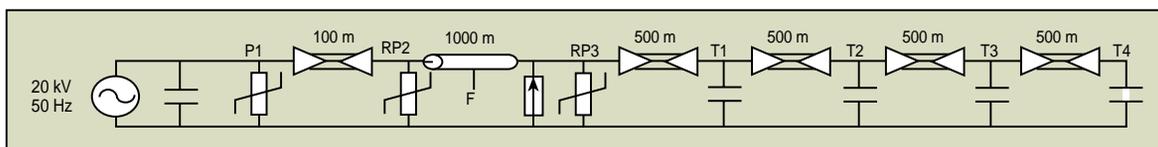


Figura 2: Modelo de la línea de distribución aérea-subterránea.

se-cuba es pequeña. El rayo se representa por medio de una fuente de corriente que produce un impulso negativo de 10 kA y 8/20  $\mu$ s.

La Figura 2 presenta el circuito utilizado en la simulación. El condensador que aparece a la izquierda es la capacidad fase-cuba (2 nF) del transformador AT/MT. P1 es el pararrayos que protege la salida de línea. A continuación vienen 100 m de cable que pasan a aéreo en RP2, donde se encuentra el pararrayos del entronque aéreo-subterráneo. Tras 1000 m de línea aérea (donde puede caer un rayo) se llega al entronque RP3 donde comienza la línea subterránea. Esta está protegida únicamente por el juego de pararrayos en RP3 y está formada por cuatro tramos de 500 m de cable, que alimentan a los transformadores T1, T2, T3 y T4 que se han modelado por una capacidad fase-cuba de 2 nF.

Como el interés de este estudio se centra en la tensión fase-cuba que se transfiere al transformador, se ha supuesto una puesta a tierra perfecta de las armaduras de los cables en los entronques aéreo-subterráneo y de las cubas de los transformadores. También se considera que las armaduras tienen la misma tensión a lo largo de toda la longitud del

cable. Por tanto la línea inferior de la Figura 2 es un nudo de tensión de referencia y representa la tensión de la armadura del cable. Si se estudiara la tensión transferida a BT, el modelado de la puesta a tierra sería fundamental y la tensión del nudo de referencia vendría marcada por el tipo de puesta a tierra.

### 3. Sobretensiones de origen atmosférico en líneas de distribución mixtas aéreas y subterráneas

Para el circuito de la Figura 2 el caso más desfavorable se produce cuando el rayo cae en RP3 (cabecera de la línea subterránea) y la tensión inicial en RP3 pasa por el máximo positivo ( $20/\sqrt{3} \times \sqrt{2}=16,33$  kV). La Figura 3 presenta las tensiones en los puntos T1, T3 y T4. La tensión en T1 es aproximadamente la tensión residual del pararrayos RP3. Se observa

cómo se parte de una tensión inicial de 16,33 kV y a continuación se produce una súbita bajada hasta alcanzar -61,4 kV. Al incidir la onda del rayo en el pararrayos RP3 se propaga por la línea subterránea una onda negativa de tensión y corriente. La tensión de esta onda tiene que cancelar la tensión positiva inicial en RP3 y añadir los -61,4 kV de tensión residual del pararrayos. Por tanto la cresta total de la onda incidente es de  $-16,33-61,4=-77,73$  kV (si la tensión inicial en RP3 fuera de -16,33 kV en lugar de 16,33 kV, la cresta sería de  $16,33-61,4=-45,07$ , kV que es mucho menor). Cuando esta onda incidente llega hasta el final de la línea subterránea (T4), se refleja conservando la misma cresta y polaridad negativa. Al sumarse los -61 kV (tensión residual del pararrayos) de la onda incidente con los -77,73 kV de la onda reflejada se produciría un pico de tensión en T4 de -138,73 kV que está muy cerca de los -141,9 kV de la simulación (ver Tabla I).

Punto considerado	RP3	T1	T2	T3	T4
Tensión mínima (kV)	-61,7	-61,4	-124	-136	-141,9
MP(%)BIL=125 kV	50,64	50,88	0,8	-8,8	-13,52

Tabla I: Sobretensiones y márgenes de protección en los transformadores del circuito de la Figura 2.

En cuanto a la tensión en T3 empieza teniendo la misma forma que T1 con un retraso de tiempo igual al tiempo de viaje de la onda incidente desde T1 a T3. Transcurrido el tiempo de viaje de la onda incidente desde T3 a T4 y el tiempo de viaje de la onda reflejada de T4 a T3, se superpone la onda reflejada a la tensión de T3 produciendo otra súbita disminución que casi alcanza la de T4 (ver tensión de T3 y T4 en la Figura 3).

El nivel de protección de un equipo frente a una sobretensión se utiliza el llamado margen de protección. Este se define como el valor en tanto por ciento respecto del nivel de aislamiento (BIL), de la diferencia entre el BIL y la sobretensión que sufre el equipo. Márgenes de protección negativos indican que la sobretensión está por encima del BIL. Las normas recomiendan un margen de protección mínimo de un 20%. La Tabla I muestra que los márgenes de protección (MP) de los distintos transformadores están muy por debajo de los niveles mínimos.

Resumiendo, en el extremo de la línea se produce una duplicación de la tensión residual del pararrayos<sup>[1]</sup> que sobrepasa el nivel de aislamiento de los transformadores (125 kV). Por tanto un único pararrayos en la

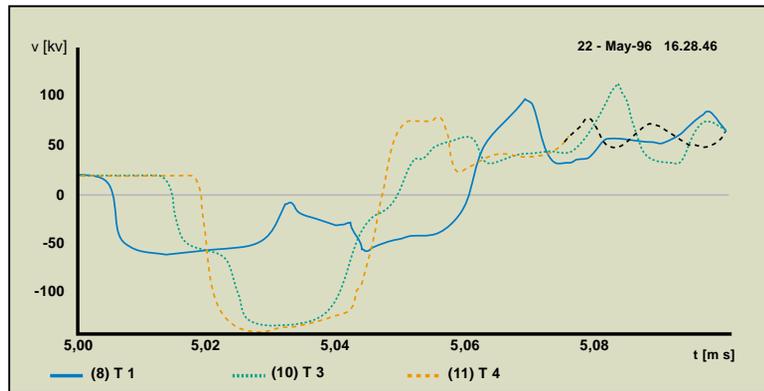


Figura 3: Sobretensiones en los transformadores T1, T3 y T4, cuando incide en el entronque aéreo subterráneo un rayo de 10 kA, 8/20  $\mu$ s.

cabecera de la línea subterránea no es suficiente para garantizar la protección de la cadena de transformadores aguas abajo.

#### 4. Mejora de la protección frente a sobretensiones de origen atmosférico en líneas de distribución mixtas aéreas subterráneas

Para mejorar la protección de la línea de distribución lo más inmediato sería instalar un pararrayos en el extremo abierto de la línea subterránea<sup>[2]</sup> que se encuentra en el centro de reflexión (ver figura 1) tal y como se muestra en la Figura 4.

De esta forma se limita la sobretensión del extremo

(PE4) a la tensión residual del pararrayos. Sin embargo se sigue produciendo una onda reflejada de tensión de la misma polaridad y algo menos de la mitad de amplitud que la onda de tensión incidente (en el apéndice A se hace una discusión de este fenómeno). Esto provoca una sobretensión en el último transformador (T4) de un poco menos de 1,5 veces la tensión residual del pararrayos (ver tabla II). En la Figura 5 y la Tabla II puede observarse cómo la sobretensión en T3 es semejante (aunque algo menor) a la de T4. Debido a la proximidad al pararrayos de cabecera, la sobretensión en T2 es prácticamente la tensión residual del pararrayos. Este esquema de protección mejora notablemente los resultados respecto a la situación inicial. Los márgenes de protección están por encima del 20% mínimo aun-

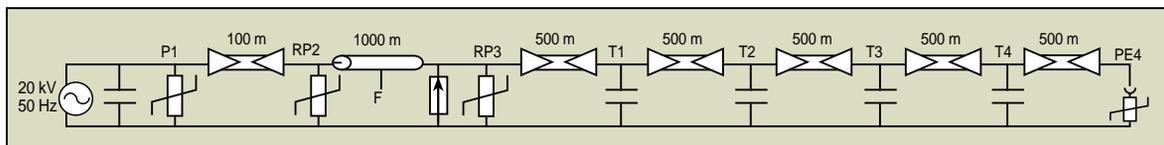


Figura 4: Primer esquema de protección: se añade un pararrayos en el extremo de la línea (PE4).

que todavía no son demasiado elevados (especialmente el de T4).

Para mejorar aún más la protección propuesta puede procederse a añadir un juego de pararrayos más en el último transformador<sup>[2]</sup> antes del centro de reflexión (T4) tal y como se muestra en la Figura 6.

De esta forma la onda que incide en el pararrayos a mitad de línea (punto T4 de la Figura 6) produce una onda reflejada de polaridad opuesta a la incidente (en el apéndice A se hace una discusión de este fenómeno). Al sumarse esta onda reflejada (de polaridad opuesta a la incidente) con la incidente, la sobretensión disminuye en los transformadores aguas arriba desde este pararrayos (por eso se pone en el último transformador). El pararrayos en el extremo de la línea situado en el centro de reflexión (el punto C6D de la Figura 6) protege el cable impidiendo que se doble la tensión. Es necesario que la separación entre el último pararrayos y el pararrayos en medio de la línea sea superior a 100 m. Si esto no ocurre, el efecto del pararrayos en PE4 es poco relevante. Las sobretensiones que se han simulado para este último esquema de protección se presentan en la Figura 7.

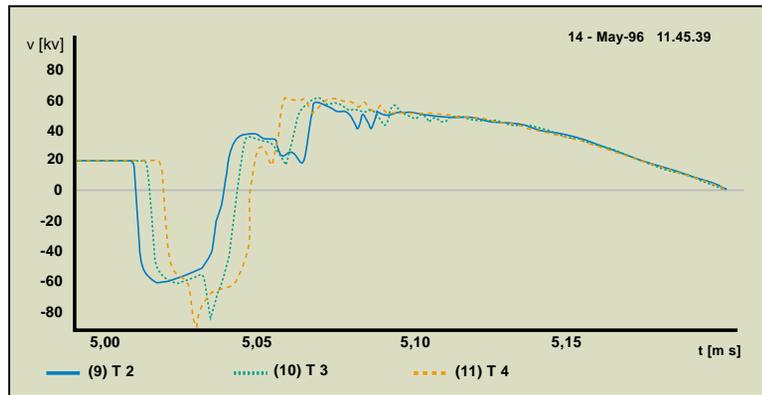


Figura 5: Sobretensiones en los dos últimos transformadores de la red de distribución (T4 y T3) y en el transformador T2 (coincide con la del pararrayos) cuando se añade un pararrayos en el extremo abierto de la línea subterránea. El rayo que incide en el entronque aéreo-subterráneo es de 10 kA, 8/20  $\mu$ s.

Punto considerado	RP3	T1	T2	T3	T4
Tensión mínima (kV)	-61,75	-61,4	-61,3	-83,68	-90,25
MP(%BIL)=125 kV	50,60	50,88	50,96	33,06	27,80

Tabla II: Sobretensiones y márgenes de protección para el primer esquema de protección.

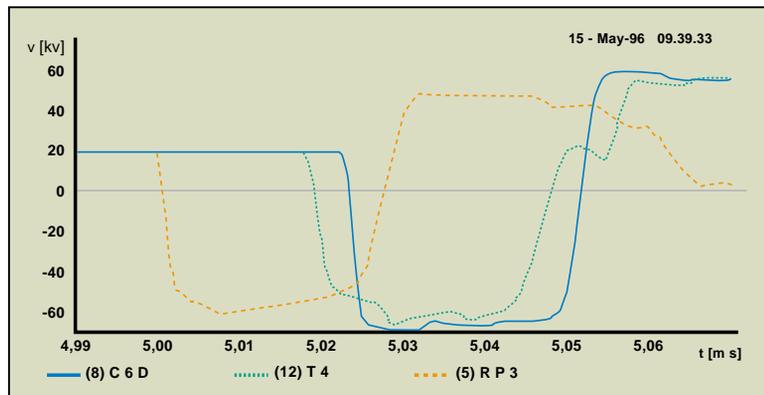


Figura 7: Sobretensiones en pararrayos del entronque aéreo subterráneo (RP3), el extremo de la línea (C6D) y el último transformador aguas abajo de la línea (T4). El rayo que incide en el entronque aéreo-subterráneo es de 10 kA, 8/20  $\mu$ s.

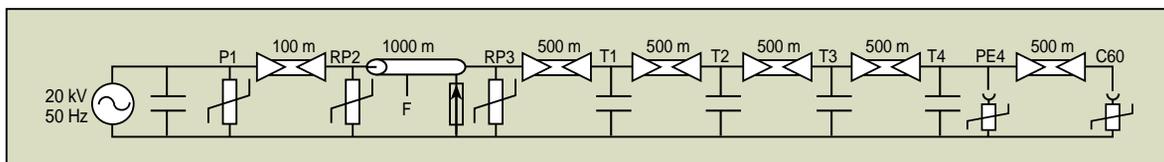


Figura 6: Segundo esquema de protección: se añade un pararrayos en el extremo de línea (C6D) y otro en el último transformador (T4).

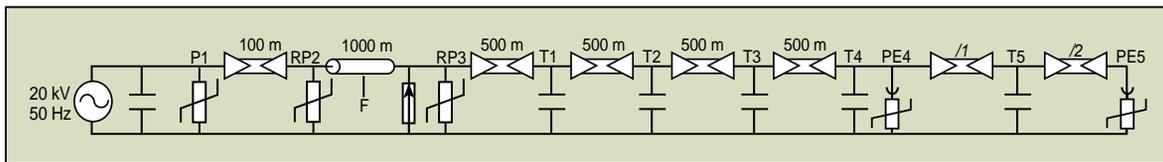


Figura 9: Esquema con un transformador entre los dos pararrayos de protección.

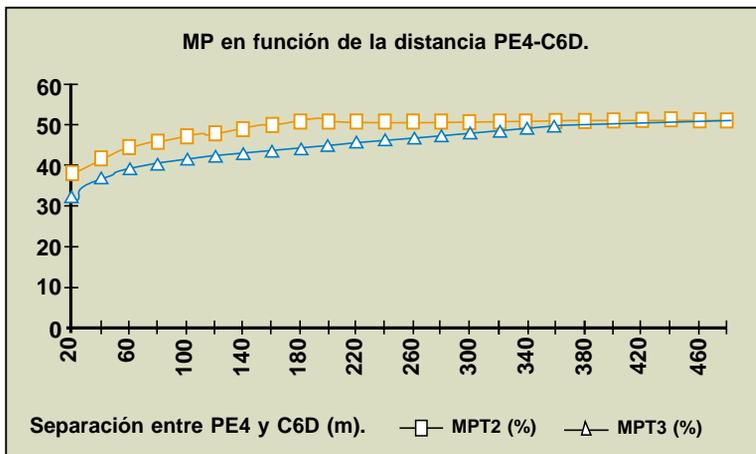


Figura 8: Influencia de la distancia de separación entre los pararrayos situados en PE4 y C6D en los márgenes de protección de los transformadores.

Punto considerado	RP3	T1	T2	T3	T4	C6D
Tensión mínima (kV)	-61,7	-61,4	-124	-136	-141,9	-70,17
MP(%)BIL=125 kV	50,64	50,88	0,8	-8,8	-13,52	43,86

Tabla III: Sobretensiones y márgenes de protección para el segundo esquema de protección.

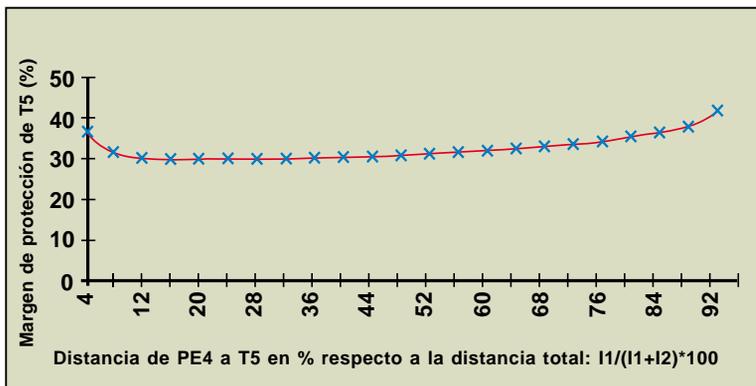


Figura 10: Variación del margen de protección en función de la posición de T5 entre PE4 y PE5.

La Tabla III muestra los márgenes de protección que se logran con este segundo esquema de protección. Estos márgenes están cerca de los que se conseguirían poniendo un juego de pararrayos en bornes de cada transformador de distribución. Este esquema asegura una correcta protección de la línea subterránea y los elementos conectados a ella.

La Figura 8 muestra la influencia de la distancia entre los pararrayos situados en PE4 y C6D en los márgenes de protección de los transformadores. Los márgenes de protección de los transformadores que están cerca de estos pararrayos (T1 y T4) apenas dependen de la separación PE4-C6D. Sin embargo los que se encuentran entre medias (T2 y T3) tienen una dependencia mucho mayor. A partir de 100 m de separación se obtienen unos márgenes de protección aceptables. No obstante es a partir de unos 380 m cuando se logran los mejores resultados.

Existen casos en los que la geometría de la red subterránea difiere de la óptima presentada en este artículo. Un caso muy frecuente se da cuando el último transformador está muy cerca del centro de reflexión o cuando no existe tal centro de reflexión y la línea subterránea termina en el

último transformador. En estos casos es posible que para garantizar una separación suficiente entre los dos pararrayos de protección, sea necesario dejar algún transformador entre ellos. La Figura 9 muestra este caso (ver T5).

La figura 10 presenta cómo varía el margen de protección del transformador T5 cuando su posición relativa se mueve de PE4 a PE5 y la longitud entre los dos pararrayos (I1 + I2) es de 500 m. Si esta longitud varía entre 260 m y 500, los márgenes de protección no varían sustancialmente (en torno a un máximo de un 9%), por lo que la Figura 10 puede dar valores orientativos para longitudes entre pararrayos menores de 500 m.

## 5. Conclusiones

Las conclusiones sobre la protección de líneas de distribución mixtas aéreas y subterráneas frente a sobretensiones de origen atmosférico son las siguientes:

1. La protección basada únicamente en la colocación de un juego de pararrayos en el entronque aéreo-subterráneo de la cabecera de la línea subterránea, es insuficiente para una correcta protección.

2. La mejor forma de protección de una línea subterránea consiste en poner un pararrayos en el último transformador y otro en el extremo abierto de la red de distribución (en el centro de reflexión).

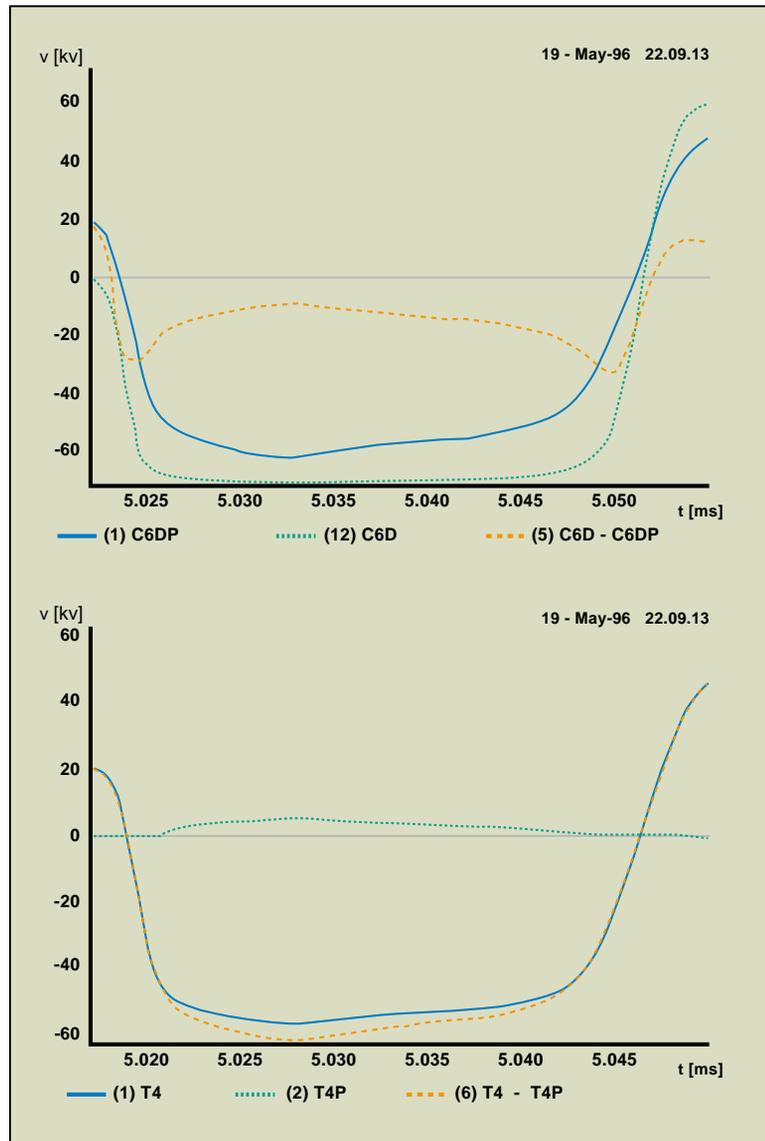


Figura 11: Onda reflejada en el extremo de la línea subterránea con un pararrayos conectado (arriba) y onda reflejada en un pararrayos situado en un punto intermedio de la línea (abajo).

mador y otro en el extremo abierto de la red de distribución (en el centro de reflexión).

3. Los márgenes de protección se mejoran cuando la separación entre los dos pararrayos aumenta. Cuando la sepa-

ración supera los 500 m, se consiguen los márgenes de protección óptimos.

4. Para obtener unos márgenes de protección razonables la distancia de separación entre los dos pararrayos debe ser de al menos 100 m.

## Apéndice A

Este apéndice explica con más detalle cómo son las ondas que se reflejan en el final de una línea subterránea con un pararrayos conectado y las ondas que se reflejan en un pararrayos que se encuentra en un punto intermedio de la línea.

La figura 11 (gráfica superior) muestra las formas de onda de las tensiones involucradas. La tensión C6D proviene de simular el circuito de la figura 4 sin pararrayos en PE4 y con un cable muy largo a continuación de PE4. Por tanto esta tensión es la inicial que había en el circuito antes de que cayera el rayo (16,33 kV), más la onda incidente. La tensión C6DP es la tensión del punto PE4 que resulta de la simulación del circuito de la figura 4. Esta tensión son los 16,33 kV iniciales, más la tensión incidente, más la tensión reflejada. Por tanto, la tensión reflejada resulta de restar C6D menos C6DP. Se observa que tiene polaridad negativa (igual que la polaridad de la onda incidente).

La característica no lineal del pararrayos tiene dos zonas importantes. La primera se produce cuando el pararrayos empieza a entrar en estado de conducción: pequeños cambios de corriente producen cambios muy grandes de tensión. La segunda se da cuando se alcanza el estado pleno de conducción

y la característica tensión-corriente se satura: se necesitan cambios muy grandes de corriente producir pequeños cambios de tensión. La corriente de la onda incidente (tensión incidente multiplicada por la impedancia característica de la línea) se tiene que descargar por el pararrayos. Por eso, la pendiente de C6D al principio es mayor que la de la onda incidente C6DP (antes de la plena conducción pequeños cambios de corriente provocan cambios muy grandes de tensión). Cuando se alcanza el estado de conducción total, la tensión del pararrayos (C6D) se hace casi constante (tensión residual del pararrayos), pues se necesitan cambios muy grandes de corriente para lograr pequeños cambios de tensión. La tensión de C6D en estado de conducción es mayor que la de C6DP, porque la onda incidente de tensión es la tensión residual del pararrayos más los 16,33 kV iniciales (que divididos por la impedancia característica de la línea producen un sobreexceso de corriente incidente que da lugar a mayor tensión residual). Por tanto, la onda reflejada tiene polaridad negativa debido a que la tensión de C6D crece más rápidamente que la de C6DP al pasar a conducción y a que C6D tiene un sobreexceso de tensión residual debido a al tensión inicial del circuito, en el estado de conducción.

La figura 11 (gráfica inferior) muestra el caso de la fi-

gura 4, situando un juego de pararrayos adicional en el transformador T4. TP4 es la tensión de este caso en el transformador 4. T4 es la tensión de la onda incidente y T4-T4P es la tensión de la onda que se refleja en el transformador 4 (debido al juego de pararrayos) y viaja de vuelta hacia T1. Es importante señalar que la onda reflejada tiene una polaridad contraria a la incidente y por tanto, al viajar hacia T1, va reduciendo las sobretensiones producidas por la onda incidente. 

## Agradecimientos

Los resultados presentados en este artículo fueron obtenidos en un proyecto de investigación patrocinado por Unión Fenosa. Se agradecen los comentarios y sugerencias de A. Vázquez de Unión Fenosa y de D. Vindel de Unión Fenosa Ingeniería.

## Bibliografía

- [1] J. A. Martínez Velasco y S. Boggarra Rodríguez, "Sobretensiones en redes de distribución". Actas de las V Jornadas Internacionales de Aislamiento Eléctrico Labein, Zamudio, Vizcaya, Octubre 1995, pp. 3.1/1-3.1/18.
- [2] M. V. Lat, "A Simplified Method for Surge Protection of Underground Distribution Systems with Metal Oxide Arresters". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 4, October 1987, pp. 1110-1116.
- [3] J. J. Burke, Power Distribution Engineering. Marcel Dekker, Inc. Editions, New York, 1994.