



UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES

**UIT-T**

SECTOR DE NORMALIZACIÓN  
DE LAS TELECOMUNICACIONES  
DE LA UIT

**K.16**

**PROTECCIÓN CONTRA LAS PERTURBACIONES**

---

**MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO PARA  
EVALUAR LOS EFECTOS DE INDUCCIÓN  
MAGNÉTICA DE LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS  
EN LOS REPETIDORES TELEALIMENTADOS  
DE LOS SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN  
POR PARES COAXIALES**

**Recomendación UIT-T K.16**

(Extracto del *Libro Azul*)

---

## NOTAS

- 1 La Recomendación UIT-T K.16 se publicó en el Tomo IX del Libro Azul. Este fichero es un extracto del Libro Azul. Aunque la presentación y disposición del texto son ligeramente diferentes de la versión del Libro Azul, el contenido del fichero es idéntico a la citada versión y los derechos de autor siguen siendo los mismos (Véase a continuación).
- 2 Por razones de concisión, el término «Administración» se utiliza en la presente Recomendación para designar a una administración de telecomunicaciones y a una empresa de explotación reconocida.

© UIT 1988, 1993

Reservados todos los derechos. No podrá reproducirse o utilizarse la presente Recomendación ni parte de la misma de cualquier forma ni por cualquier procedimiento, electrónico o mecánico, comprendidas la fotocopia y la grabación en micropelícula, sin autorización escrita de la UIT.

## Recomendación K.16

### MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO PARA EVALUAR LOS EFECTOS DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA DE LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS EN LOS REPETIDORES TELEALIMENTADOS DE LOS SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN POR PARES COAXIALES

(Ginebra, 1972)

#### 1 Resumen

En [1] se hace una exposición general que abarca todos los casos posibles de inducción magnética y que permite calcular, en función de la ubicación, la variación de las tensiones y corrientes inducidas cuando una ruta está expuesta, total o parcialmente, a la inducción. En la presente Recomendación se dan indicaciones generales para determinar un circuito equivalente que permite calcular con rapidez los valores máximos de tensión y de corriente en los conductores de un cable, cualesquiera que sean la longitud y la posición de la sección del cable expuesta a la inducción. Las capacidades concentradas y la impedancia de transferencia de este circuito equivalente deben elegirse adecuadamente. Sólo son necesarios aquí dos grupos de parámetros, según que la longitud de la sección expuesta sea menor, igual o mayor que la mitad de la sección de alimentación inductora. En el anexo A se indica la manera de pasar de las fórmulas complejas de [1] al cálculo simplificado.

Para verificar la utilidad de este circuito equivalente de aplicación general, en el anexo B se han calculado los valores máximos de las tensiones y de las corrientes inducidas en los conductores de un cable cuando los conductores exteriores están a potencial flotante, para algunos de los valores de aproximación que han sido objeto de una aplicación numérica en [1]. Estos valores se han presentado también en gráficos y puede comprobarse que el método de cálculo indicado en el citado anexo B proporciona resultados bastante precisos para una utilización práctica.

El anexo C muestra cómo debe modificarse el circuito equivalente en el caso de que los conductores exteriores de los pares coaxiales estén conectados a tierra en los extremos y en los puntos de amplificación.

En [2] figura también un método de cálculo análogo sobre los efectos de la inducción magnética de las líneas eléctricas en los sistemas de telecomunicación instalados en cables de pares coaxiales cuyo conductor exterior está aislado.

#### 2 Ventajas del circuito equivalente

Entre las magnitudes de referencia dadas en las fórmulas exactas de [1] y [2], figura la tensión longitudinal inducida en el cable, que se puede calcular por los métodos usuales (véanse las Directrices).

Una vez conocida la tensión longitudinal inducida en el cable, estas fórmulas exactas permiten una evaluación numérica muy precisa de las tensiones y de las corrientes inducidas, pero los resultados obtenidos difieren de los valores reales debido a la limitada precisión con que se dan los parámetros fundamentales utilizados; no obstante, la experiencia demuestra que esta precisión es pequeña, ya que ciertos factores importantes – como la conductividad efectiva del suelo – no pueden determinarse con exactitud.

Dada la imprecisión inherente al cálculo de la tensión longitudinal inducida, utilizada como magnitud de referencia, en el desarrollo del cálculo se tolera un error suplementario de un 20% aproximadamente, como máximo. Se pueden, pues, simplificar considerablemente las fórmulas exactas para todas las aplicaciones (ya que en la práctica se tiene casi siempre  $\Gamma \cdot l \leq 2$  y  $\bar{\Gamma} \cdot l \leq 2$ ); entonces, para cada caso, se pueden encontrar circuitos equivalentes correspondientes ( $\Gamma$  y  $\bar{\Gamma}$  son, respectivamente, las constantes de propagación de los circuitos *cubierta del cable-conductor exterior* y *conductor exterior-conductor interior*).

#### 3 Enunciado del problema

Se pueden considerar circuitos equivalentes para los cuatro casos de inducción siguientes:

- 1) conductor exterior puesto a tierra, inducción uniforme;
- 2) conductor exterior con un potencial flotante, inducción uniforme (véase la figura A-1/K.16);
- 3) conductor exterior puesto a tierra, exposición parcial en una pequeña longitud en el centro de la sección;
- 4) conductor exterior con un potencial flotante, exposición parcial en una pequeña longitud en el centro de la sección (véase la figura A-2/K.16).

En la práctica, tener que considerar un solo circuito equivalente en vez de cuatro representa una gran simplificación. Además, es ventajoso poder definir por medio de la referencia [1] un circuito equivalente uniforme de aplicación general que proporcione indicaciones suficientemente precisas sobre los valores máximos de las tensiones y de las corrientes inducidas en un cable, incluso en el caso de aproximación parcial en cualquier lugar del recorrido entre la sección de alimentación y la línea inductora.

Como se verá en el anexo A, tal circuito equivalente se puede determinar por medio de los esquemas de circuitos objeto de las figuras A-1/K.16 y A-2/K.16. Este circuito está representado en la figura 2/K.16.

#### **4 Parámetros empleados y notaciones**

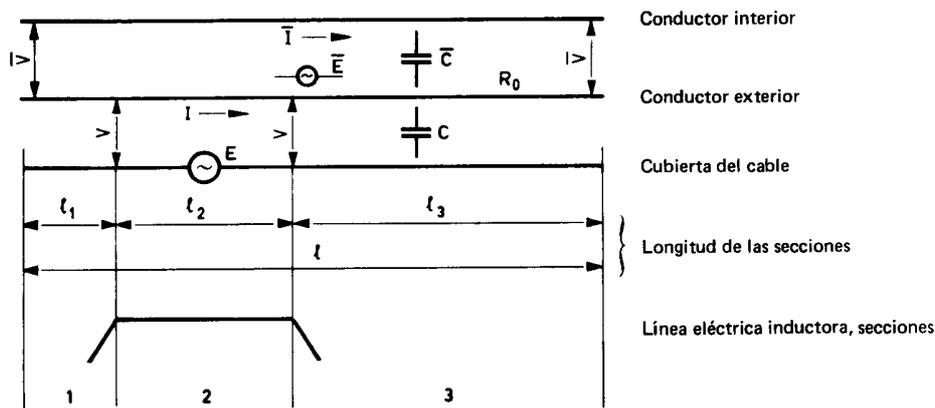
En la hipótesis general de que una sección de alimentación con los conductores exteriores puestos a un potencial flotante (es decir, sin unión a la cubierta del cable o a un sistema de puesta a tierra) esté expuesta a la inducción a lo largo de una sección de posición arbitrariamente elegida, se puede trazar la figura 1/K.16 siguiente que indica las convenciones y notaciones adoptadas.

Se utilizarán los símbolos  $E, C, V, I$  para las magnitudes relativas al circuito , *cubierta del cable-conductor exterior*, y los símbolos  $\bar{E}, \bar{C}, \bar{V}, \bar{I}$ , para las magnitudes relativas al circuito *conductor exterior-conductor interior*.

#### **5 Circuito equivalente de aplicación general**

Las consideraciones expuestas en el anexo A permiten definir un circuito equivalente de aplicación general, que se representa en la figura 2/K.16.

Para todos los sistemas de comunicación a larga distancia cuyas secciones de alimentación estén, ya uniformemente expuestas a la inducción magnética, ya parcialmente expuestas a esta inducción en una parte central de corta longitud, el circuito equivalente permite determinar los valores máximos de las tensiones y corrientes inducidas en los dos circuitos de la figura 1/K.16 con un 10% aproximadamente de precisión. Cuando se aplica este circuito a otros casos de inducción, pueden producirse errores de hasta un 20% de los valores teóricos. Este porcentaje, sin embargo puede tolerarse en la práctica dada la imprecisión inherente a la determinación de la tensión longitudinal inducida  $E$  y en vista de que el método permite obtener resultados rápidos.



CCITT - 38620

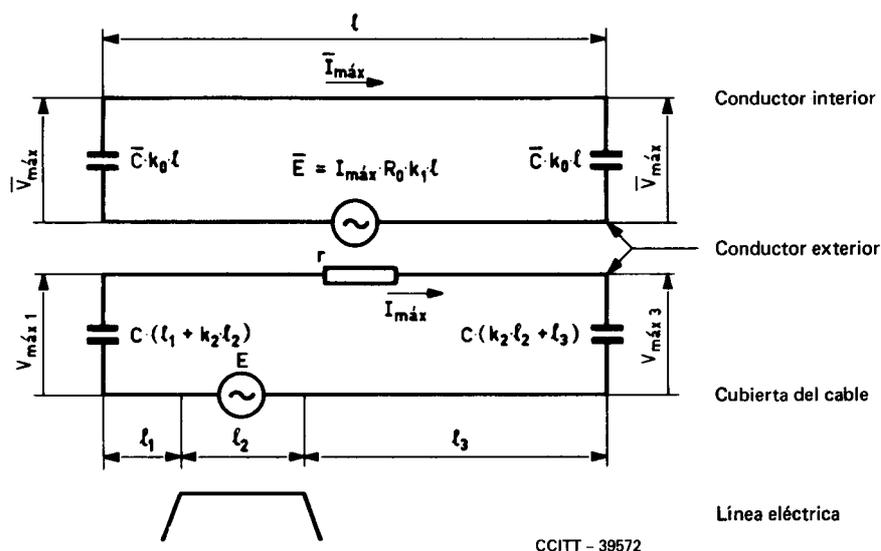
- $E$  = tensión longitudinal inducida en el cable (voltios)  
 $\bar{E}$  = tensión longitudinal en el par coaxial (voltios)  
 $l_2$  = longitud de la sección expuesta (km)  
 $l_1, l_3$  = longitudes de las secciones no expuestas (km)  
 $l$  = longitud de la sección de alimentación (km) =  $l_1 + l_2 + l_3$   
 $V, \bar{V}, I, \bar{I}$  = valores máximos que hay que determinar para las tensiones y las corrientes inducidas  
 $C, \bar{C}$  = capacidades efectivas por unidad de longitud (F/km)  
 donde

$$C = \frac{C_{0s} \cdot l_s + C'_{0s}}{l_s} \text{ y } \bar{C} = \frac{C_{i0} \cdot l_s + C_f}{l_s}$$

- $C_{0s}$  = capacidad por unidad de longitud entre el conductor exterior y la cubierta del cable (F/km)  
 $C'_{0s}$  = capacidad entre el conductor exterior y la cubierta del cable en el lugar donde eventualmente se encuentra un repetidor (F)  
 $C_{i0}$  = capacidad por unidad de longitud entre el conductor exterior y el conductor interior (F/km)  
 $C_f$  = total de todas las capacidades entre el trayecto de alimentación y el conductor exterior en los filtros de separación de alimentación de un repetidor (F)  
 $l_s$  = longitud de la sección de alimentación (km)  
 $Z_t$  = impedancia efectiva de transferencia por unidad de longitud ( $\Omega$ /km) entre el circuito *cubierta del cable* - *conductor exterior* y el circuito *conductor exterior* - *conductor interior*  
 $R_0$  = resistencia por unidad de longitud ( $\Omega$ /km) del conductor exterior solamente  
 $R_i$  = resistencia por unidad de longitud ( $\Omega$ /km) del conductor interior a la que se agrega un término correctivo correspondiente al valor, por kilómetro, de la resistencia de los filtros direccionales.

FIGURA 1/K.16

Representación esquemática de los circuitos



Valor de los parámetros $k$			
	$k_0$	$k_1$	$k_2$
para $l_2 \leq \frac{l}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$
para $l_2 > \frac{l}{2}$	$\frac{5}{16}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{4}$

*Nota* — La resistencia  $r$  sólo hay que tenerla en cuenta en los casos de los conductores exteriores conectados a tierra (véase el anexo C).

FIGURA 2/K.16  
Circuito equivalente

Las observaciones siguientes permiten comprender mejor el esquema simplificado:

- 1) Todos los elementos de las líneas de transmisión del caso real se suponen concentrados, lo que es aceptable para una línea abierta en los dos extremos y corta, teniendo en cuenta la longitud de onda que corresponde a 50 Hz.
- 2) En los circuitos no se toma en cuenta la resistencia de los conductores, salvo para constituir la impedancia de transferencia de un circuito al otro, en que se introduce ponderada por un coeficiente  $k_1$  que depende de la longitud de la sección expuesta de modo que  $k_1 < 1$ .

Esto supone que los circuitos de la figura 2/K.16 están efectivamente abiertos (para las corrientes inducidas a 50 Hz) en los extremos de la sección de telealimentación. Puede no ser así, en particular si los equipos de alimentación contienen filtros y dispositivos de equilibrio para fijar los potenciales de los conductores interiores con relación a la tierra. El circuito *conductor interior-conductor exterior* está entonces cerrado con condensadores de valor elevado que deben agregarse en paralelo a  $C k_0 l$  en los dos extremos de la figura 2/K.16. En este caso, no puede ya despreciarse la resistencia en serie del conductor interior. En el anexo C se da un ejemplo de aplicación.

- 3) Las capacidades  $C l_1$  y  $C l_3$  corresponden a la terminación exacta más allá de la sección expuesta. La capacidad de la sección expuesta se introduce ponderada por un coeficiente que depende de la longitud de la sección expuesta de modo que  $2 k_2 < 1$ .

- 4) El esquema simplificado conduce a tensiones asimétricas en el circuito *cubierta-conductor exterior*. Permite determinar los valores máximos en los extremos. En la figura 3/K.16 se da una representación práctica de la tensión y de la intensidad a todo lo largo de la sección de telealimentación. La tensión varía poco fuera de la sección expuesta, y es nula cerca de su centro. La intensidad máxima se encuentra cerca del centro de la sección expuesta; la intensidad es evidentemente nula en los extremos, puesto que el circuito está abierto en el caso del conductor exterior a potencial flotante.

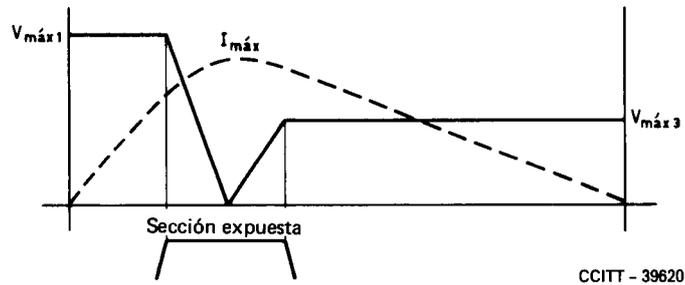


FIGURA 3/K.16  
Tensión e intensidad a lo largo de la sección de telealimentación en el circuito *cubierta - conductor exterior*

- 5) En cambio, en el circuito *conductor interior-conductor exterior*, la tensión y la intensidad son mucho más simétricas. La capacidad está ponderada por un coeficiente  $k_0$  que depende de la longitud de la sección expuesta, de modo que  $2 k_0 < 1$ .
- 6) El esquema simplificado permite, como se indica en el apartado 4), calcular en el circuito *conductor interior-conductor exterior* la tensión y la intensidad máximas. Según la naturaleza del circuito considerado estos valores pueden ser mucho más bajos que en el circuito *cubierta-conductor exterior*. En la figura 4/K.16 se da una representación práctica de la tensión y de la intensidad a todo lo largo de la sección de telealimentación. Las tensiones extremas son simétricas; la tensión nula y la intensidad máxima están siempre muy cerca del centro de la sección de telealimentación, cualquiera que sea la posición de la sección expuesta.

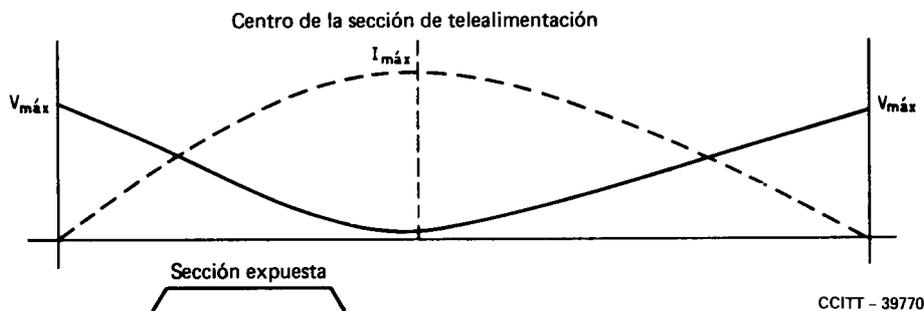


FIGURA 4/K.16  
Tensión e intensidad a lo largo de la sección de telealimentación en el circuito *conductor interior - conductor exterior*

## ANEXO A

(a la Recomendación K.16)

### Justificación de los parámetros que figuran en el circuito equivalente de aplicación general

#### A.1 Caso general

En [1] se dan sistemas de ecuaciones que contienen los parámetros complejos de transmisión de los dos circuitos de que se trata.

Estas ecuaciones permiten resolver completamente el problema en el caso de los circuitos abiertos en los dos extremos. Estas fórmulas desarrollan un número importante de términos en funciones hiperbólicas de parámetros complejos que complican su aplicación. Para llegar a un esquema muy sencillo que permita un cálculo elemental, se necesitan varias etapas de aproximación.

#### A.2 Primera etapa – Exposición simétrica – Esquema simplificado

Las fórmulas generales se aplican a dos casos de exposición simétrica representados en las figuras A-1/K.16 y A-2/K.16. En el primer caso, la exposición abarca toda la sección de telealimentación; en el segundo, está limitada a una pequeña longitud en el centro de la sección. Las curvas resultantes de los cálculos figuran en la referencia [1] y se representan en la figura B-1/K.16.

#### A.3 Segunda etapa – Exposición simétrica – Esquema simplificado

Se tiene en cuenta la corta longitud eléctrica de las líneas y del ángulo de fase próximo a  $\pm 45^\circ$  de los parámetros secundarios de propagación. Esto permite reemplazar los elementos distribuidos por condensadores y resistencias concentradas representadas en las figuras A-1/K.16 y A-2/K.16. Los coeficientes tales como  $5/16$ ,  $1/4$ ,  $1/2$ ,  $1/3$  provienen del desarrollo en serie de los términos hiperbólicos complejos.

Los circuitos equivalentes de las figuras A-1/K.16 y 1-2/K.16 permiten efectuar el cálculo de las tensiones e intensidades máximas en dos casos de exposición simétrica; como estos casos son muy excepcionales, hay que relacionar con ellos el caso general de una exposición asimétrica de cualquier longitud. Tal es el objeto de la etapa siguiente.

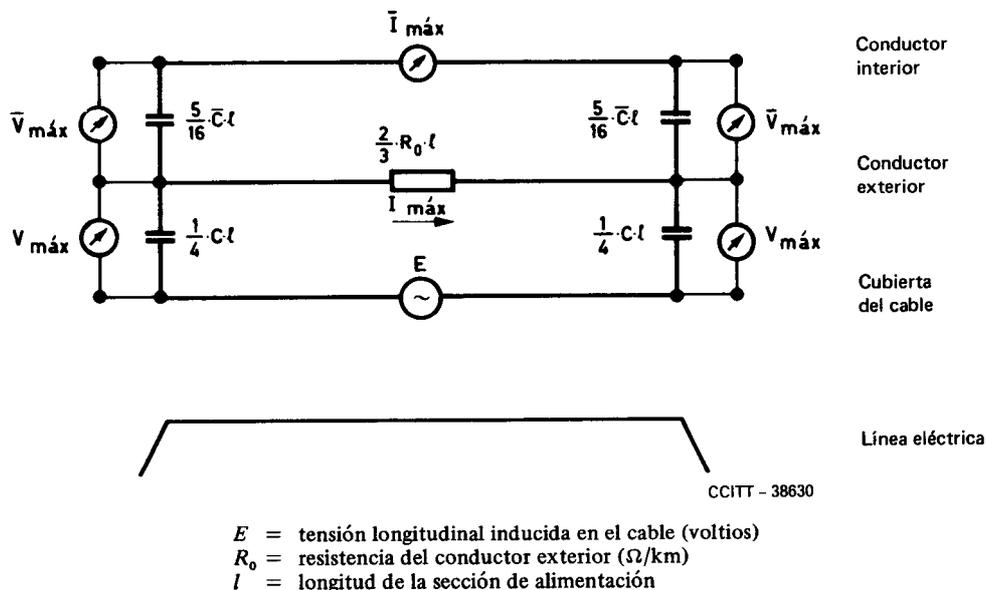


FIGURA A-1/K.16  
Exposición uniforme a la inducción de la sección de alimentación

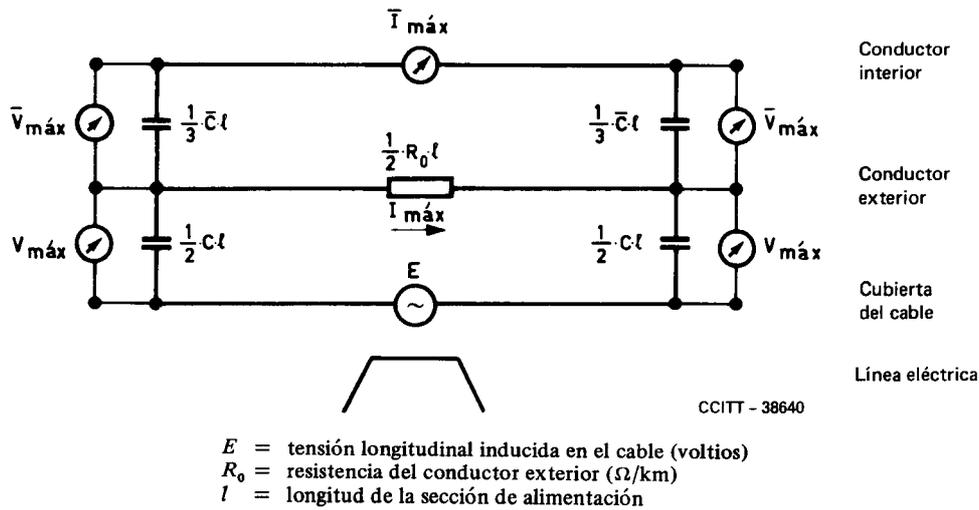


FIGURA A-2/K.16  
Exposición parcial de un tramo corto en el centro de la sección

A.4 Tercera etapa – Caso general – Esquema simplificado

A.4.1 Circuito cubierta del cable-conductor exterior

En la sección expuesta 2, cuya longitud es  $l_2$ , el circuito *cubierta del cable-conductor exterior* puede tratarse como una línea bifilar expuesta a una inducción uniforme terminada por las capacidades de línea de las secciones 1 y 3 adyacentes no expuestas.

Cuando la sección 2 es mucho más larga que las secciones 1 y 3 ( $l_2 \gg l/2$ ), las distribuciones de corriente y de tensión dependen sobre todo de la sección propia expuesta y son casi completamente simétricas con relación al punto medio de la sección. Los valores efectivos de capacidad indicados en la figura A-1/K.16 para una línea bifilar expuesta a una inducción uniforme pueden aplicarse entonces a la sección 2. Así, para  $l_2 \gg l/2$  se obtendrá el esquema representado en la figura A-3/K.16.

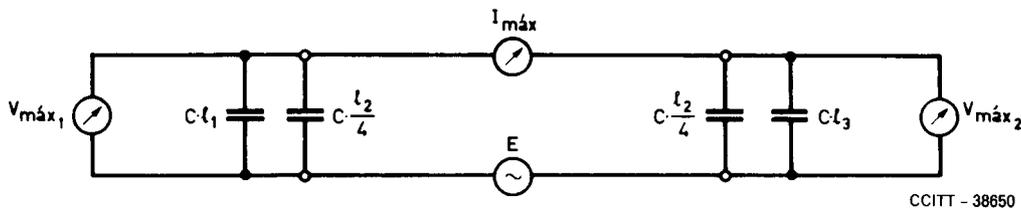


FIGURA A-3/K.16  
Circuito cubierta del cable – conductor exterior en el caso de una sección expuesta larga

Por el contrario, cuando la sección expuesta es mucho más corta que las secciones no expuestas ( $l_2 \ll l/2$ ), la distribución de la corriente y la de la tensión dependen, sobre todo, de las admitancias en los extremos de la sección. El máximo de corriente inducida se desplaza hacia el extremo de la sección 2 adyacente a la más larga de las dos secciones no expuestas. Este máximo se desplaza más cuando la sección 2 se halla directamente situada al principio o al final de la sección de alimentación ( $I_1 = 0$  o  $I_3 = 0$ , respectivamente). En este caso límite,  $l_2$  tiende a encontrarse en las mismas condiciones que una línea bifilar sometida a una inducción uniforme y uno de cuyos extremos se halla en cortocircuito.

Entonces se utilizará el circuito equivalente de la figura A-4/K.16 para determinar el valor máximo de la corriente inducida.

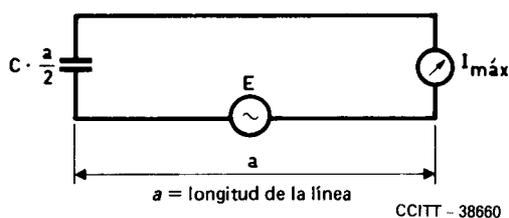


FIGURA A-4/K.16

Línea terminada por un cortocircuito en un extremo

Este esquema corresponde a la mitad de la figura A-1/K.16 relativa a una línea de longitud  $l = 2 \cdot a$ , sometida a inducción uniforme, estando abiertos los dos extremos y estableciéndose una conexión en la mitad de la ruta. Esta conexión no modifica las condiciones.

Ahora bien, como el extremo de la sección 2 no está en cortocircuito en el caso límite que nos interesa, sino que esta sección termina en admitancias finitas ( $\omega C \cdot l_3$  y  $\omega C \cdot l_1$ , respectivamente), la capacidad efectiva localizada  $C \cdot l_2/x$  asociada a la sección 2 en el circuito equivalente parcial estará comprendida entre:

$$C \cdot \frac{l_2}{4} < C \cdot \frac{l_2}{x} < C \cdot \frac{l_2}{2} \quad \text{en el extremo en que se encuentra la prolongación más corta y}$$

$$C \cdot \frac{l_2}{4} > C \cdot \frac{l_2}{x} > 0 \quad \text{en el otro extremo.}$$

Como se verá más adelante, el hecho de tomar  $x = 3$  en cada extremo constituye una fórmula transaccional que da resultados satisfactorios para todas las ubicaciones de la sección expuesta cuando tiene poca longitud. En consecuencia, para  $l_2 \ll l/2$  se obtiene la siguiente configuración (figura A-5/K.16).

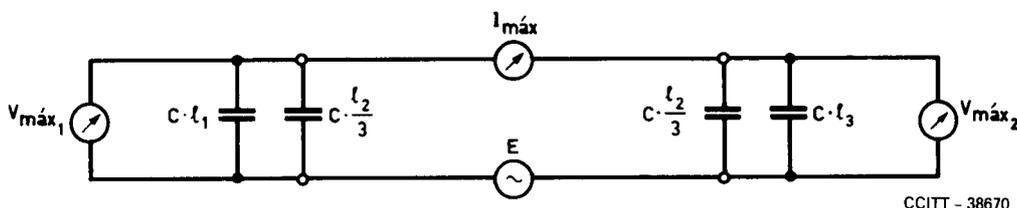


FIGURA A-5/K.16

Circuito cubierta del cable – conductor exterior. Caso de una sección expuesta corta

#### A.4.2 Impedancia efectiva de transferencia<sup>1)</sup>

La corriente  $I$  que circula por el circuito *cubierta del cable-conductor exterior* genera una tensión longitudinal  $\bar{E}$  en los terminales de la resistencia del conductor exterior del sistema de pares coaxiales. Esta corriente  $I$  alcanza su máximo en la sección expuesta y tiende a cero en los extremos de la ruta. La resistencia efectiva que ha de utilizarse con el máximo de corriente  $I$  es la de los circuitos equivalentes realizados según las fórmulas simplificadas. En el método del circuito equivalente se introduce una resistencia efectiva cuyo conocimiento, asociado al de la corriente  $I$ , permite calcular  $\bar{E}$ . Esta resistencia efectiva, designada por  $Z_t \cdot l$ , se llama impedancia efectiva de transferencia; sustituye a la resistencia  $R_0 \cdot l$ . El valor de  $\bar{E}$  viene dado por la igualdad  $\bar{E} = I_{máx} \cdot Z_t \cdot l$ .

Si la inducción es uniforme en toda la sección de alimentación, como en el caso de la figura A-1/K.16, el valor que ha de utilizarse para la impedancia de transferencia viene dado por:

$$Z_t \cdot l = \frac{2}{3} \cdot R_0 \cdot l.$$

1) La impedancia de transferencia se llama a menudo, también, impedancia de acoplamiento de la cubierta metálica del cable.

Este valor puede utilizarse también cuando las variaciones de la corriente a lo largo del trayecto son muy semejantes a las que se producen en el caso de una inducción uniforme ( $l_2 \gg l/2$ ).

Para una exposición parcial de corta longitud en el centro de la sección de telealimentación (véase la figura A-2/K.16), se utilizará la igualdad:

$$Z_t \cdot l = \frac{1}{2} \cdot R_0 \cdot l$$

para calcular la impedancia de transferencia.

Cuando la parte expuesta de corta longitud está situada al principio o al final de la sección de alimentación, se obtiene el mismo valor (como puede demostrarse utilizando el circuito equivalente para una exposición parcial en el centro de la sección, sustituyendo  $l$  por  $2 \cdot l$ ).

Cabe suponer, pues, en primera aproximación, que el valor obtenido no varía mucho, ni siquiera si se elige arbitrariamente la ubicación de la sección expuesta de corta longitud.

Así para la impedancia de transferencia del circuito equivalente se tiene:

$$Z_t \cdot l = \frac{2}{3} R_0 \cdot l \text{ para } l_2 \gg \frac{l}{2} \text{ y}$$

$$Z_t \cdot l = \frac{1}{2} R_0 \cdot l \text{ para } l_2 \ll \frac{l}{2}$$

#### A.4.3 Circuito conductor exterior-conductor interior

En el circuito *conductor exterior-conductor interior*, predomina la tensión longitudinal  $\bar{E}$  a lo largo de toda la sección de alimentación, incluso en el caso de una exposición parcial. Como puede verse consultando las figuras del anexo B, el mínimo de la tensión  $\bar{V}$  entre el conductor interior y el conductor exterior se produce exactamente a mitad de camino en el caso de una exposición simétrica, y casi a mitad de camino en todos los casos de exposiciones asimétricas (incluso cuando se trata de secciones muy cortas sometidas a inducción y situadas al principio o al final de la sección de alimentación). Los valores calculados para la corriente y la tensión en el par coaxial no presentarán, pues, diferencias apreciables si se supone que la intensidad de campo debida a la tensión longitudinal  $\bar{E} / l$  está distribuida simétricamente, cualesquiera que sean la longitud y la posición de la sección expuesta.

Con esta hipótesis, los esquemas de circuitos de la figura A-6/K.16, obtenidos de los representados en las figuras A-1/K.16 y A-2/K.16 para el caso de una exposición simétrica, pueden emplearse también, en general, para una configuración cualquiera.

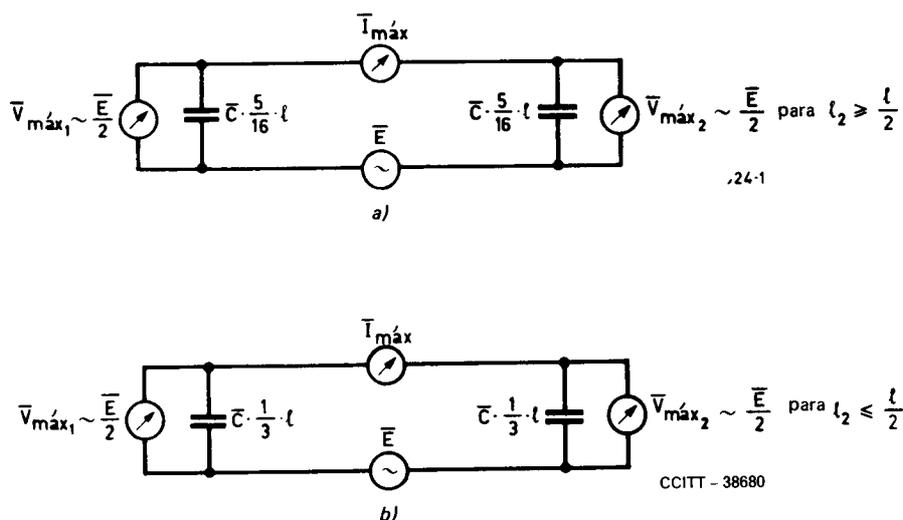


FIGURA A-6/K.16

**Circuito conductor exterior – conductor interior;**  
**a) sección expuesta larga, b) sección expuesta corta**

## A.5 Conclusión del anexo A

Reuniendo los esquemas elementales de las figuras A-3/K.16 a A-6/K.16, se obtiene un esquema de circuito equivalente de aplicación general, en el que se adoptarán para las capacidades y la impedancia de transferencia valores numéricos diferentes según la longitud de la sección expuesta:

$$l_2 \gg \frac{l}{2} \text{ y } l_2 \ll \frac{l}{2} \text{ respectivamente}$$

Como puede demostrarse con ejemplos numéricos, se obtienen resultados satisfactorios conservando los parámetros asociados al caso  $l_2 \ll l/2$  incluso cuando  $l_2 = l/2$ . Si sustituimos, pues:

$$l_2 \gg \frac{l}{2} \text{ por } l_2 > \frac{l}{2} \text{ y}$$

$$l_2 \ll \frac{l}{2} \text{ por } l_2 \leq \frac{l}{2}$$

todas las posibilidades de exposición estarán cubiertas por medio de dos grupos de parámetros y el error que afecte a las zonas intermedias permanecerá dentro de unos límites tolerables.

El circuito equivalente de aplicación general es objeto de la figura 2/K.16.

## ANEXO B

(a la Recomendación K.16)

### **Ejemplos de aplicación de los cálculos completos y del cálculo simplificado. Casos en que los conductores exteriores están con potencial flotante**

Para asegurarse de la utilidad del circuito equivalente en casos de exposición parcial arbitrariamente elegidos, se han calculado los valores máximos de las tensiones y de las corrientes por medio del circuito equivalente en ciertos casos de exposición que en [1] han sido objeto de un cálculo completo. Los valores hallados se han llevado a las figuras correspondientes reproducidas según dicha referencia.

Para los cálculos comparativos, se han utilizado los valores siguientes relativos a sistemas de 300 canales por cable con pares coaxiales de pequeño diámetro:

$$C = 0,12 \text{ } \mu\text{F/km}; \quad R_0 = 6,2 \text{ } \Omega\text{/km}; \quad \bar{C} = 0,2 \text{ } \mu\text{F/km}; \quad l = 64 \text{ km}$$

En las figuras B-1/K.16 a B-5/K.16 pueden verse curvas que, establecidas con precisión, dan las tensiones y corrientes inducidas en un sistema de telecomunicación de 300 canales. Estas figuras corresponden a las figuras 4/K.16 y A-1/K.16 a A-3/K.16, tal como aparecen en la referencia [1], habiéndose elegido como valor de referencia una tensión longitudinal  $E$  de 1000 V en vez de 2000 V. Los valores aproximados de los máximos, calculados por medio del circuito equivalente, se indican en ellas mediante puntos negros. En todos los casos, se comprueba una concordancia satisfactoria con los valores obtenidos por un análisis exacto.

#### *Ejemplo de cálculo para la figura B-4/K.16*

Se supone que en una sección de alimentación de 64 km perteneciente a un sistema de 300 canales por cable con pares coaxiales de pequeño diámetro, cuyo conductor exterior está a potencial flotante, se halla expuesta al efecto de inducción de una línea eléctrica entre los kilómetros 12 y 28. La tensión longitudinal en el cable es, por hipótesis, de 1000 V a 50 Hz y hay que evaluar los valores máximos de las tensiones y de las corrientes inducidas que aparecen en el cable.

En este caso, se tiene:  $l_1 = 12 \text{ km}$ ,  $l_2 = 16 \text{ km}$ ,  $l_3 = 36 \text{ km}$ ,  $l/2 = 32 \text{ km}$ . Como  $l_2 < l/2$ , se utilizarán los parámetros siguientes para el circuito equivalente (véase la figura 2/K.16):  $k_0 = 1/3$ ,  $k_1 = 1/2$ ,  $k_2 = 1/3$ ,  $\bar{C} = 0,2 \text{ } \mu\text{F/km}$ ,  $R_0 = 6,2 \text{ } \Omega\text{/km}$ ,  $C = 0,12 \text{ } \mu\text{F/km}$ .

Desarrollo

$$Ck_2l_2 = 0,12 \times \frac{1}{3} \times 16$$

$$Cl_1 = 0,12 \times 12 = 1,44 \mu\text{F} \quad + \quad = 0,64 \mu\text{F} \quad + \quad Cl_3 = 0,12 \times 36 = 4,32 \mu\text{F}$$

$$\underbrace{\hspace{10em}}_{2,08 \mu\text{F}} \quad + \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{4,96 \mu\text{F}}$$

$$\frac{1}{\omega C} \text{ a } 50 \text{ Hz:} \quad 1530 \Omega \quad + \quad 640 \Omega \quad = \quad 2170 \Omega$$

$$I_{\text{máx}} = \frac{1000 \text{ V}}{2170 \Omega} = 0,461 \text{ A}$$

$\times$   
 $\times$   
 $\times$

$\rightarrow$   
 $\rightarrow$   
 $\rightarrow$

$1530 \Omega = V_{\text{máx}_1} = 705 \text{ voltios}$   
 $640 \Omega = V_{\text{máx}_2} = 295 \text{ voltios}$   
 $198,5 \Omega = \bar{E} = 91,6 \text{ voltios}$

$$\frac{1}{2} R_0 l = \frac{1}{2} \times 6,2 \times 64 = 198,5 \Omega$$

$$\frac{1}{2} \bar{E} \approx \bar{V}_{\text{máx}_1} \approx \bar{V}_{\text{máx}_2} = 45,8 \text{ voltios}$$

$$\frac{1}{3} \omega \bar{C} l = \frac{1}{3} \times 314 \times 0,2 \times 10^{-6} \times 64 = 1,34 \times 10^{-3} \text{ mhos}$$

$$\bar{I}_{\text{máx}} = 1,34 \times 10^{-3} \times 45,8 = 61,5 \text{ mA}$$

CUADRO B-1/K.16

**Comparación entre los valores obtenidos mediante el circuito equivalente y los valores máximos calculados con precisión**

(Valores extraídos de la figura B-4/K.16)

Valores máximos	Valores resultantes del cálculo exacto	Valores resultantes de la aplicación del circuito equivalente	Diferencia con relación al cálculo exacto
$V_{\text{máx}_1}$	685 V	705 V	+2,9 %
$V_{\text{máx}_2}$	315 V	295 V	-6,3 %
$I_{\text{máx}}$	0,455 A	0,461 A	+1,3 %
$\bar{V}_{\text{máx}_1}$	48 V	45,8 V	-4,6 %
$\bar{V}_{\text{máx}_2}$	37,5 V	45,8 V	+22 %
$\bar{I}_{\text{máx}}$	55 mA	61,5 mA	+11,8 %

Esta comparación muestra que, exceptuando el valor de  $\bar{V}_{\text{máx}_2}$  todas las diferencias observadas con relación a los valores resultantes de un cálculo exacto son inferiores al 12% y que los valores obtenidos mediante el circuito equivalente son generalmente superiores a los resultados del cálculo exacto. La diferencia de 22% observada en el caso de  $\bar{V}_{\text{máx}_2}$  no tiene importancia práctica, puesto que sólo afecta al menor de los dos máximos de  $\bar{V}$ .

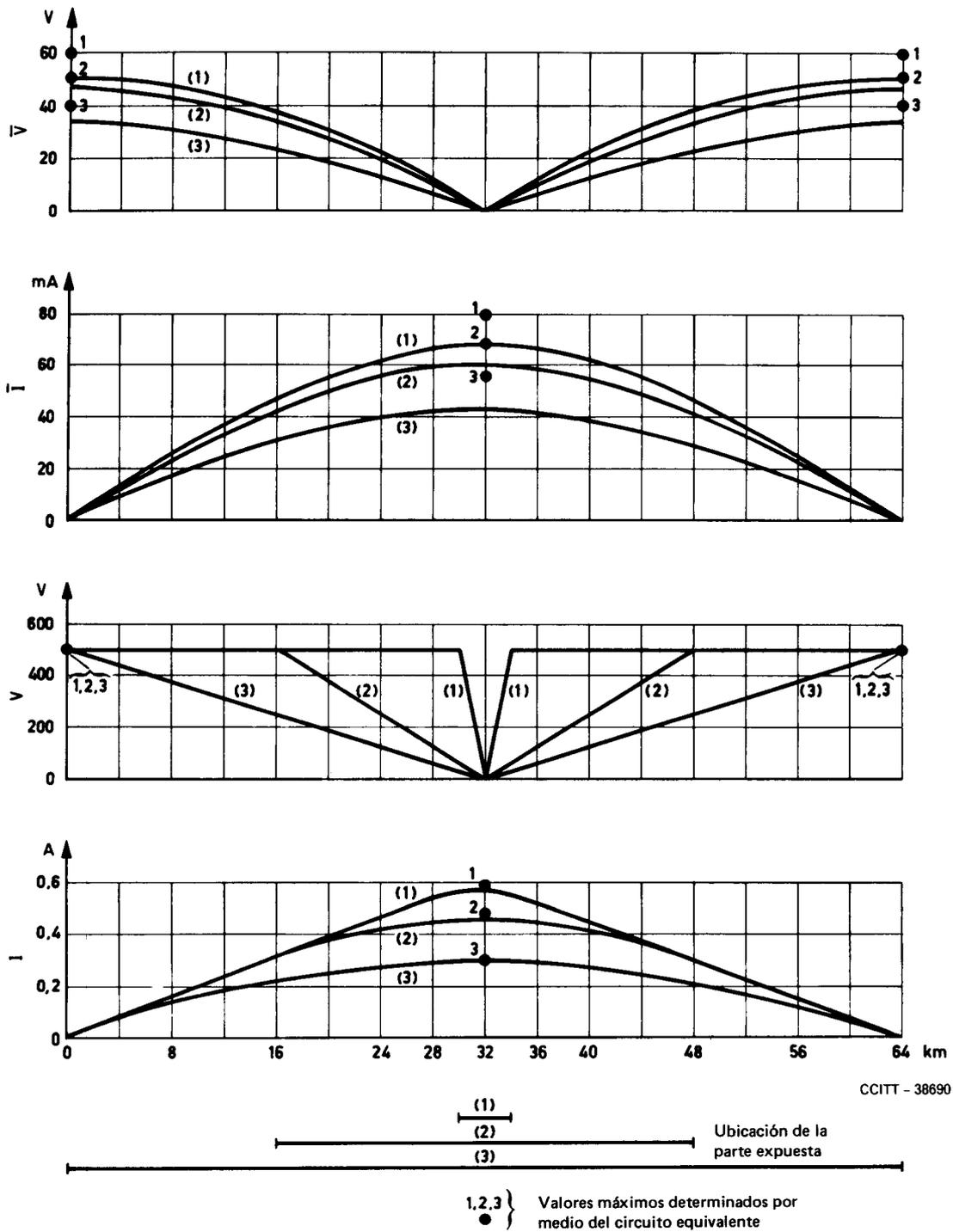


FIGURA B-1/K.16

Tensiones y corrientes que aparecen en una ruta de 300 canales en el caso de exposiciones simétricas.  
 Tensión inducida a lo largo de la sección expuesta: 1000 voltios  
 (conductores exteriores de pares coaxiales con potencial flotante)

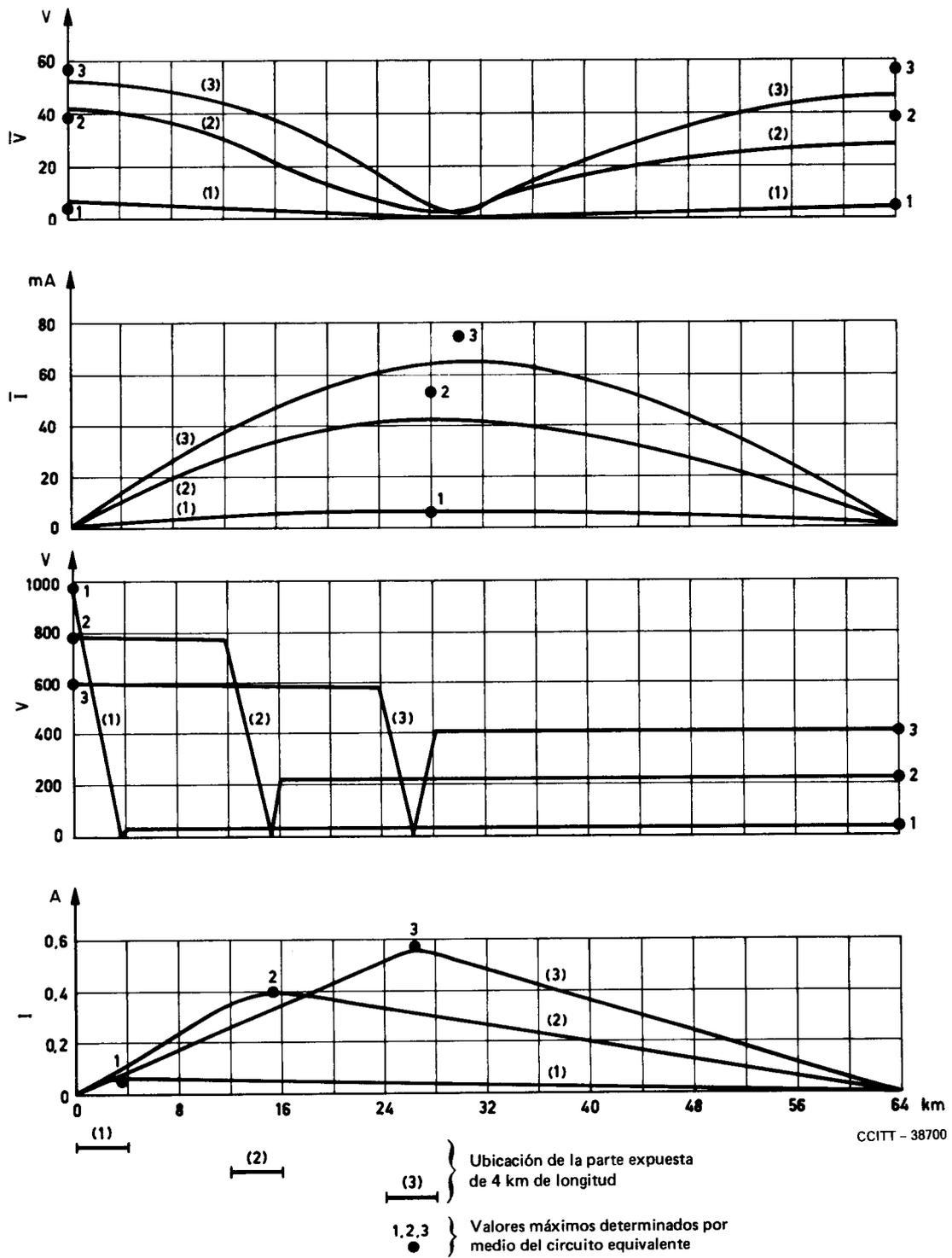


FIGURA B-2/K.16

Tensiones y corrientes que aparecen en una ruta de 300 canales en el caso de exposiciones asimétricas (longitud de exposición, 4 km). Tensión inducida a lo largo de la sección expuesta: 1000 voltios (conductores exteriores de pares coaxiales con potencial flotante)

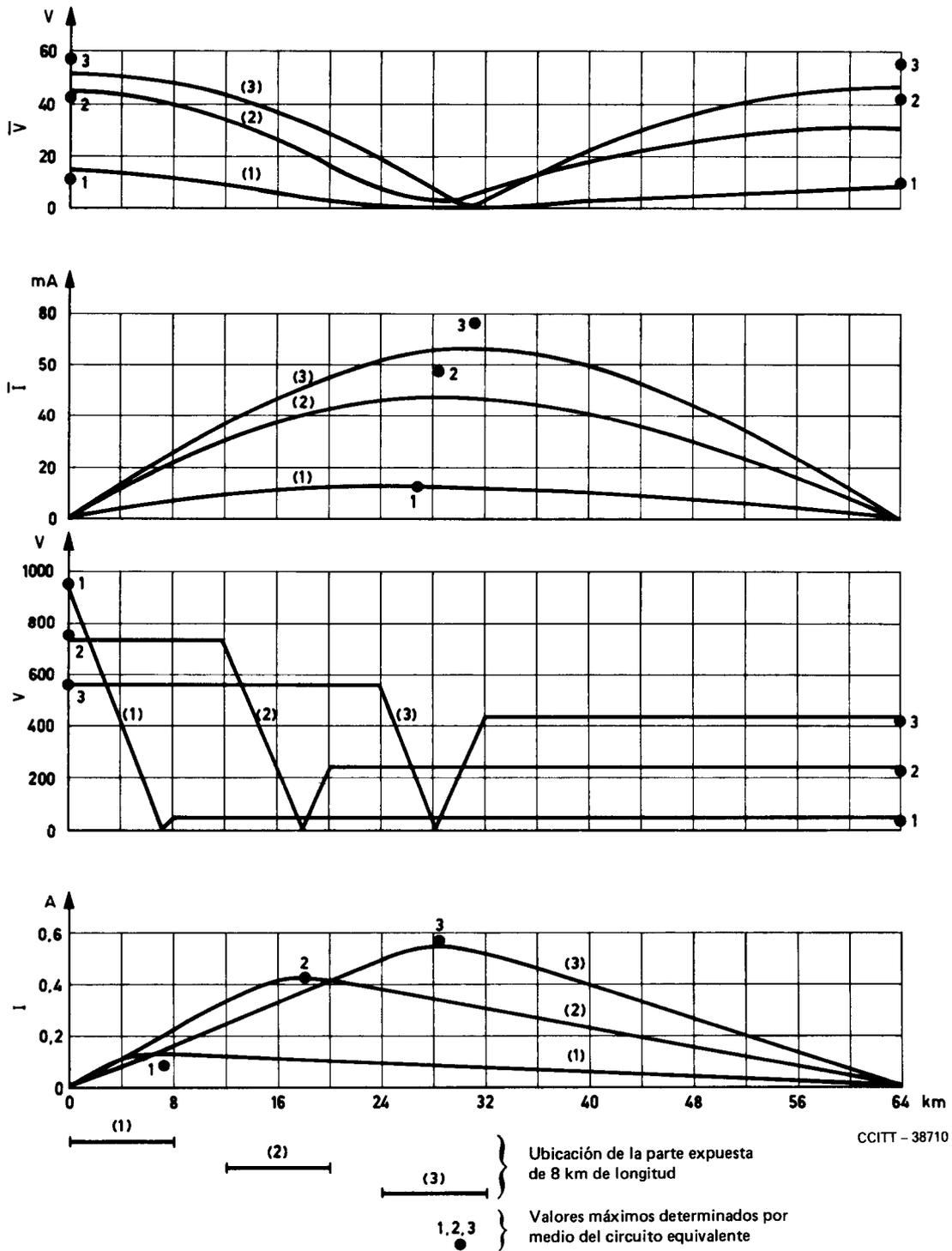


FIGURA B-3/K.16

Tensiones y corrientes que aparecen en una ruta de 300 canales en el caso de exposiciones asimétricas (longitud de exposición, 8 km). Tensión inducida a lo largo de la sección expuesta: 1000 voltios (conductores exteriores de pares coaxiales con potencial flotante)

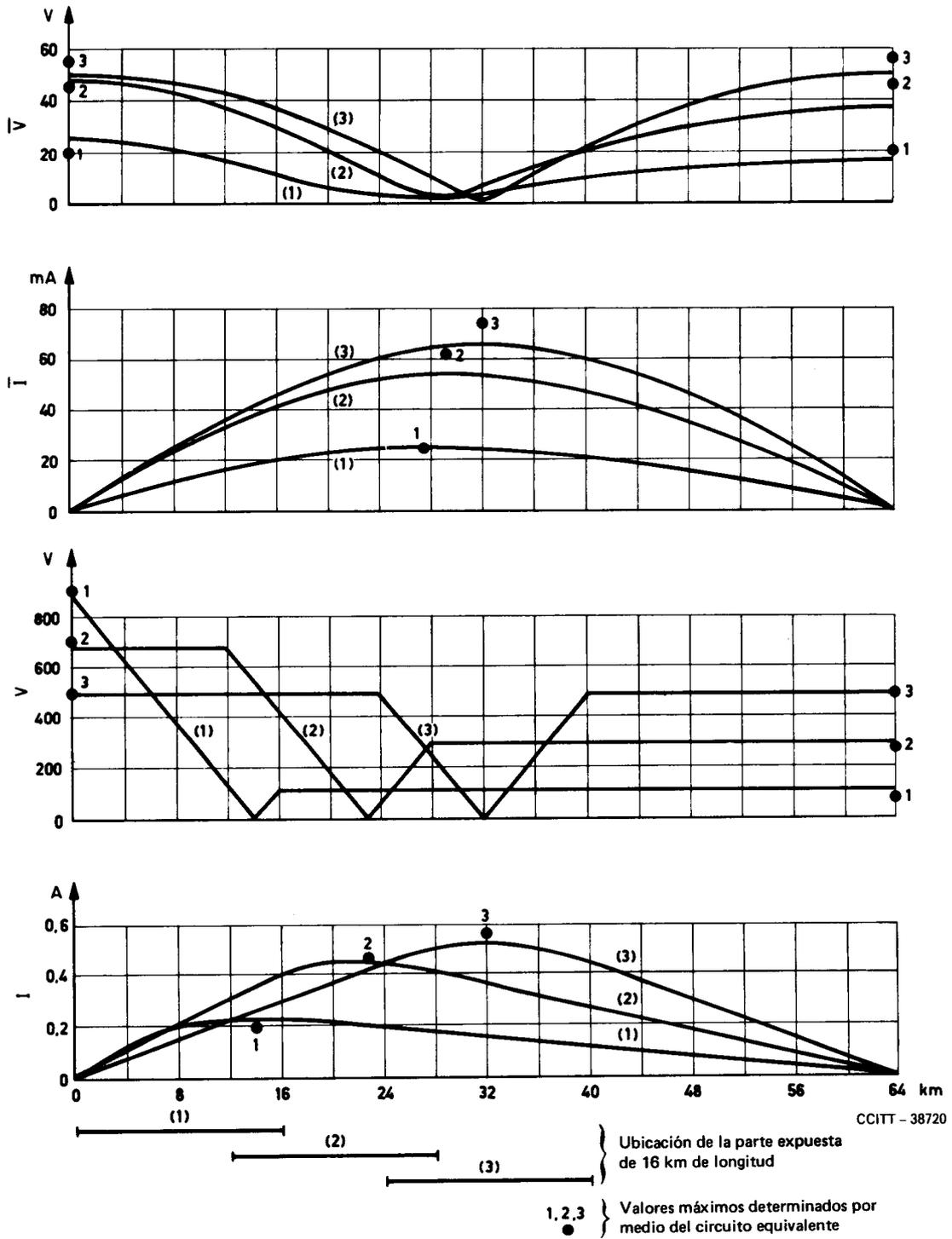


FIGURA B-4/K.16

Tensiones y corrientes que aparecen en una ruta de 300 canales en el caso de exposiciones asimétricas (longitud de exposición, 16 km). Tensión inducida a lo largo de la sección expuesta: 1000 voltios (conductores exteriores de pares coaxiales con potencial flotante)

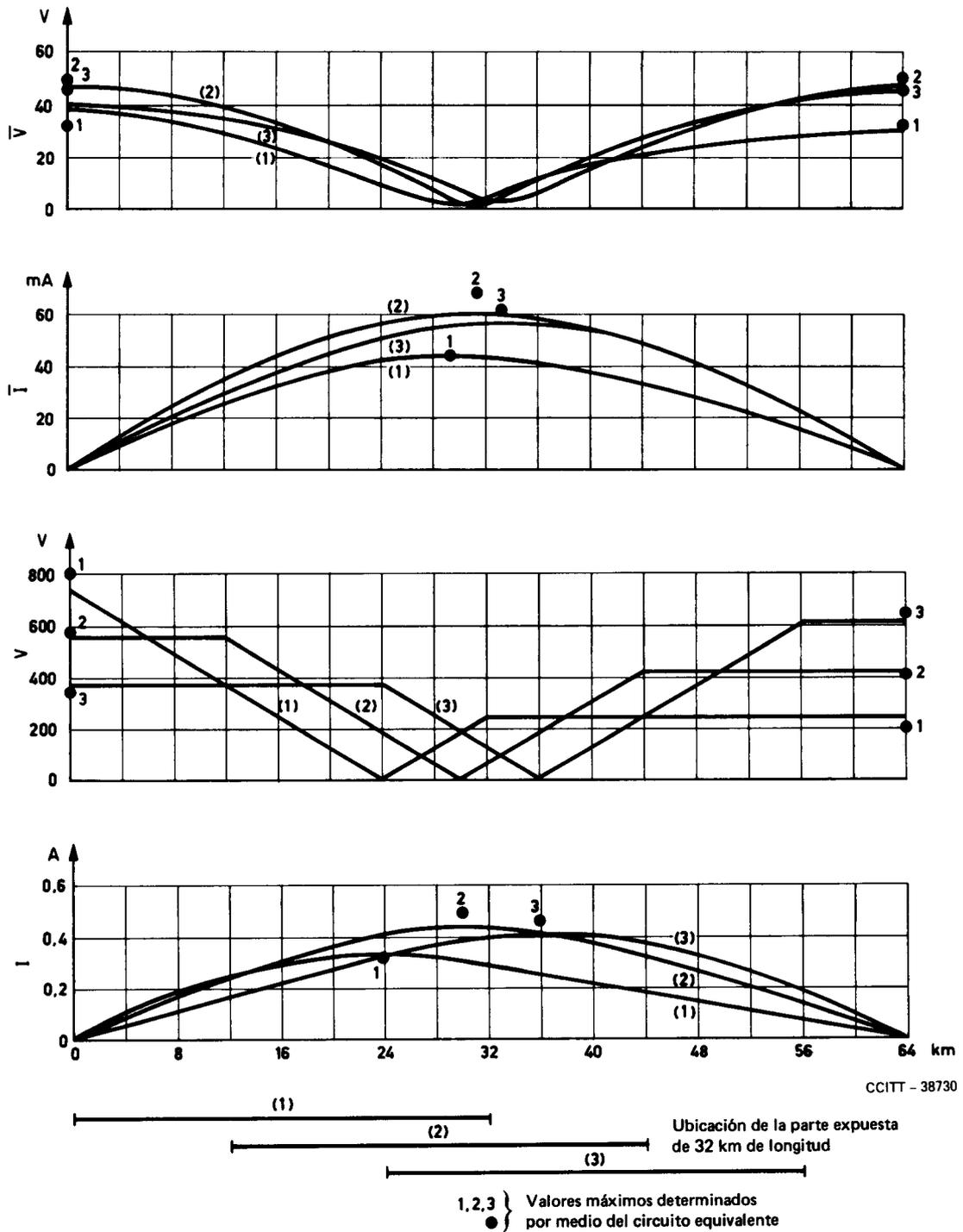


FIGURA B-5/K.16

Tensiones y corrientes que aparecen en una ruta de 300 canales en el caso de exposiciones asimétricas (longitud de exposición, 32 km). Tensión inducida a lo largo de la sección expuesta: 1000 voltios (conductores exteriores de pares coaxiales con potencial flotante)

ANEXO C

(a la Recomendación K.16)

**Ejemplos de aplicación de los cálculos completos y del cálculo simplificado.  
Caso en que los conductores exteriores están conectados a tierra**

C.1 *Conductores interiores conectados a una tensión regulada, ligeramente desacoplada*

Cuando los conductores exteriores están puestos a tierra y los conductores interiores están conectados a una tensión regulada, cuyos condensadores de desacoplamiento a tierra son de valor pequeño, sólo conviene tomar en consideración, en el circuito equivalente, la parte del esquema relativa al circuito *conductor exterior-conductor interior* e insertar, lógicamente, la capacidad  $\bar{C}$  en lugar de la  $C$ . La resistencia  $k_1 R_0 l$ , que representa la impedancia de transferencia, se ha omitido también. En este caso, el esquema universal se reduce al de la figura C-1/K.16.

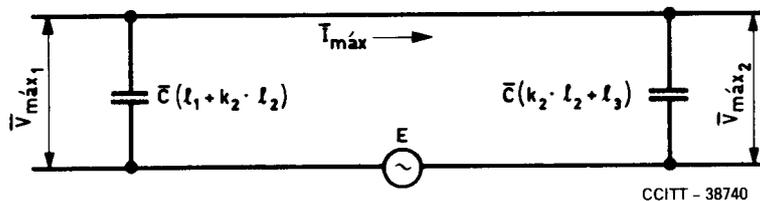


FIGURA C-1/K.16

Circuito cubierta del cable – conductor exterior (sección expuesta larga)

C.2 *Conductores interiores puestos a tierra a través de una baja impedancia situada en la estación de alimentación de energía*

En este caso, el esquema universal se reduce al de la figura C-2/K.16.

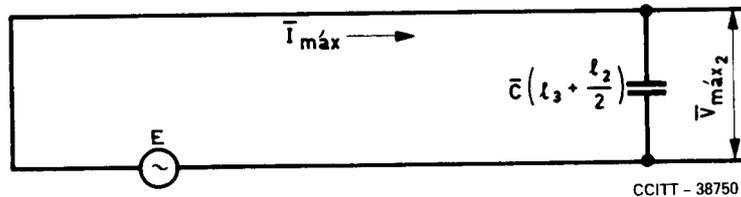


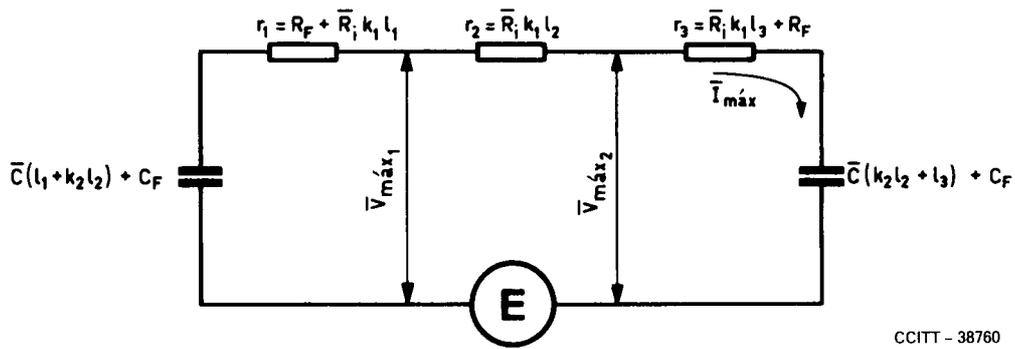
FIGURA C-2/K.16

Línea en cortocircuito en un extremo

C.3 *Conductores interiores conectados a una tensión regulada, muy desacoplada*

En el caso en que los conductores exteriores están puestos a tierra y los conductores interiores están conectados a una tensión regulada cuyos condensadores de desacoplamiento a tierra tienen valores grandes (varios  $\mu\text{F}$ ), no basta con el esquema simplificado de la figura C-1/K.16. Hay que tener en cuenta también la resistencia de los conductores centrales de los pares coaxiales (eventualmente resistencias que se encuentran en serie en las alimentaciones de los amplificadores).

Para cerciorarse de la validez del circuito equivalente modificado en este caso, se ha hecho un cálculo sobre un ejemplo concreto que corresponde a un caso de explotación. Se trata también de sistemas de 300 canales en pares coaxiales de pequeño diámetro, para los que se ha considerado un enlace de 66 km, con  $\bar{C} = 0,11 \mu\text{F}/\text{km}$ ,  $R_i = 17 \Omega/\text{km}$ , siendo equivalente la impedancia de desacoplamiento de los sistemas de alimentación regulada a una resistencia  $R_F$  de 50 ohmios en serie con una capacidad  $C_F$  de 15  $\mu\text{F}$ . En la figura C-3/K.16 se representa el esquema correspondiente.

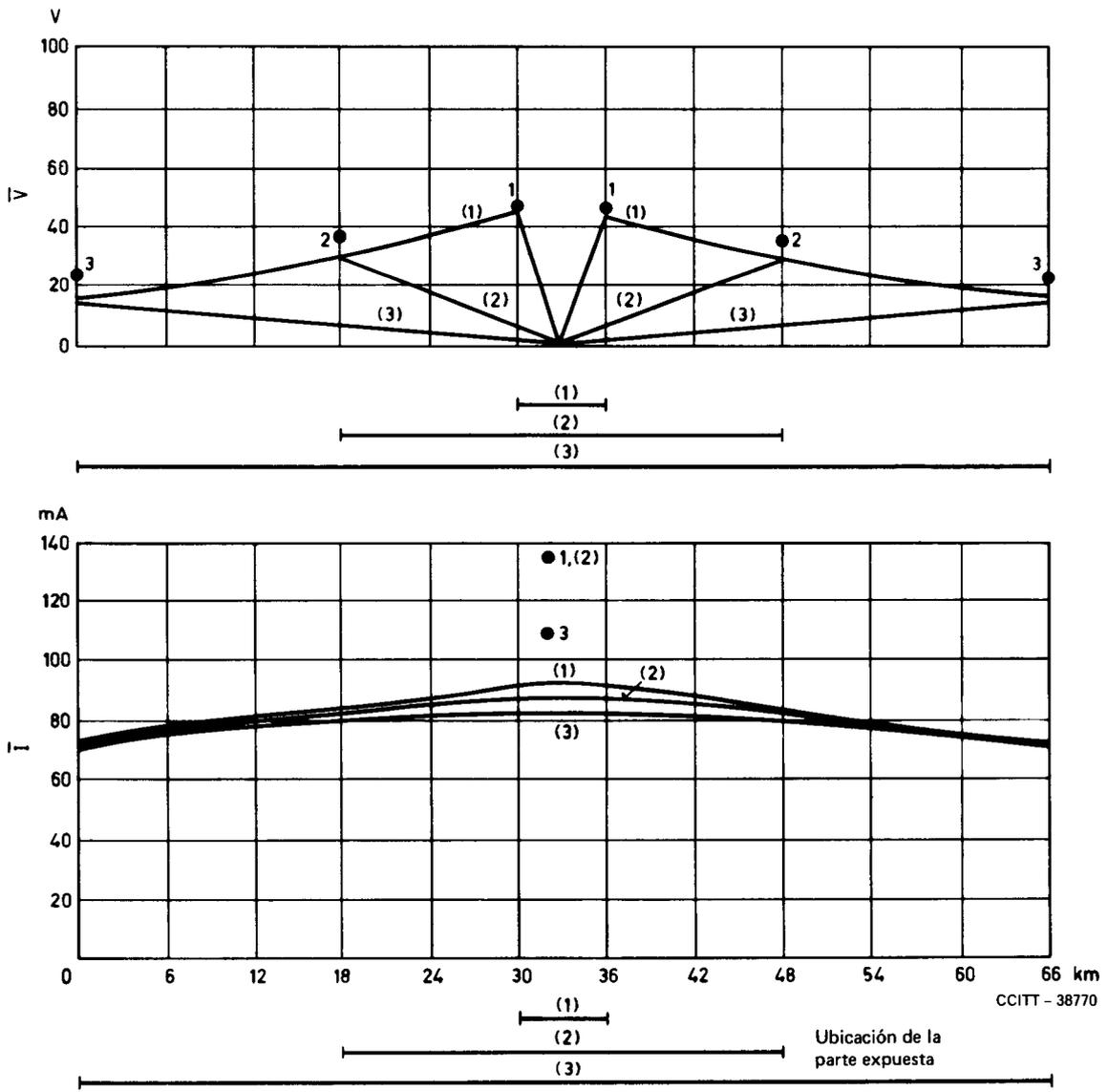


*Nota* —  $R_i$  es la resistencia por kilómetro del conductor interior más la resistencia de todos los filtros direccionales de los repetidores, expresada en valor de resistencia por kilómetro.

FIGURA C-3/K.16

**Circuito equivalente en el caso en que los conductores exteriores de pares coaxiales están conectados a tierra y los conductores interiores tienen una alimentación regulada muy desacoplada**

Se supone que la tensión inducida es tal que, teniendo en cuenta el factor de apantallamiento del cable, la tensión interferente que hay que tomar en consideración es igual a 100 voltios. (Si la tensión no pudiera limitarse a este valor, se emplearía otra solución, por ejemplo, el retorno a un potencial flotante.) Para una tensión inducida  $E = 100$  V y después de tener en cuenta el factor de apantallamiento combinado de la cubierta del cable y de los conductores exteriores puestos a tierra, las figuras C-4/K.16 a C-7/K.16 indican los valores de las tensiones y corrientes obtenidos en el circuito completo; se han llevado a las mismas figuras los puntos correspondientes a la utilización del circuito equivalente de la figura C-3/K.16. La concordancia entre las dos series de resultados es completamente satisfactoria.

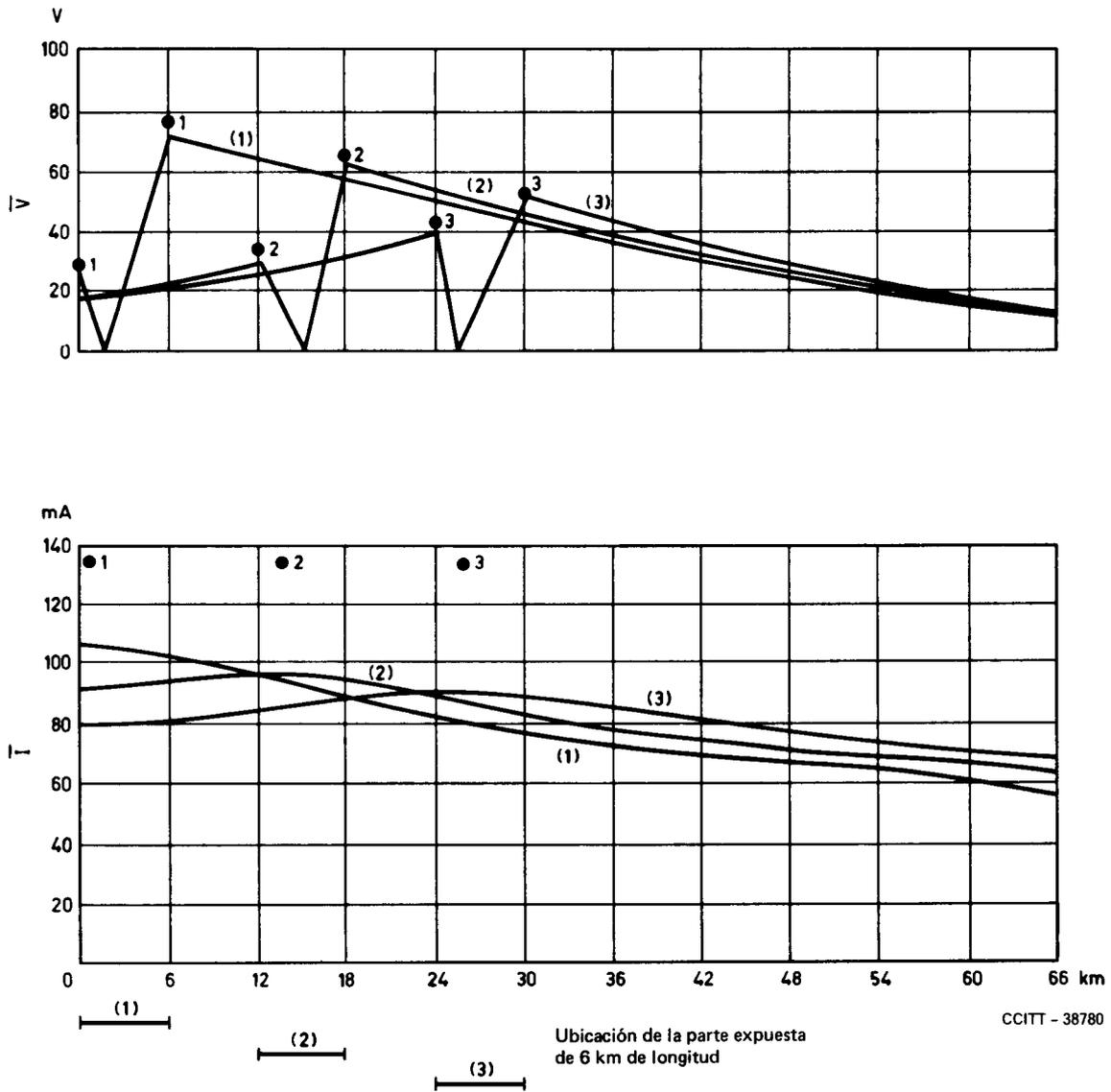


1, 2, 3 } Valores máximos determinados por medio del circuito equivalente

Longitud de exposición : 6 km, 30 km, o 66 km  
 Tensión inductora : 100 voltios

FIGURA C-4/K.16

Tensiones y corrientes que aparecen en una ruta de 300 canales en el caso de exposiciones simétricas (conductor exterior de los pares coaxiales conectado a tierra)

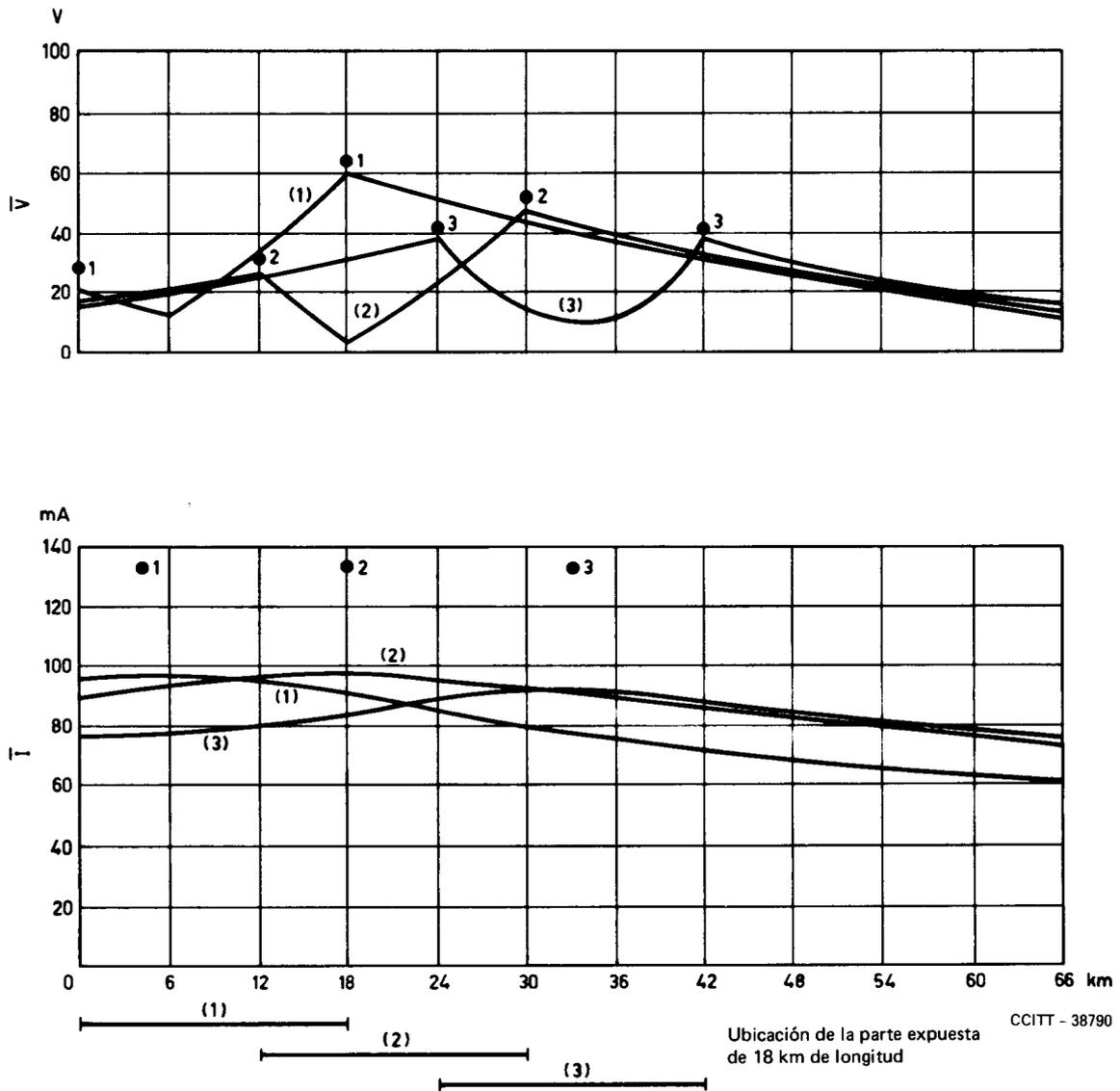


1, 2, 3 } Valores máximos determinados por  
 ● } medio del circuito equivalente

Longitud de exposición : 6 km  
 Tensión inductora : 100 voltios

FIGURA C-5/K.16

Tensiones y corrientes que aparecen en una ruta de 300 canales en el caso de exposiciones asimétricas (conductor exterior de los pares coaxiales conectado a tierra)



1, 2, 3 } Valores máximos determinados por  
 ● } medio del circuito equivalente

Longitud de exposición : 18 km  
 Tensión inductora : 100 voltios

FIGURA C-6/K.16

Tensiones y corrientes que aparecen en una ruta de 300 canales en el caso de exposiciones asimétricas (conductor exterior de los pares coaxiales conectado a tierra)

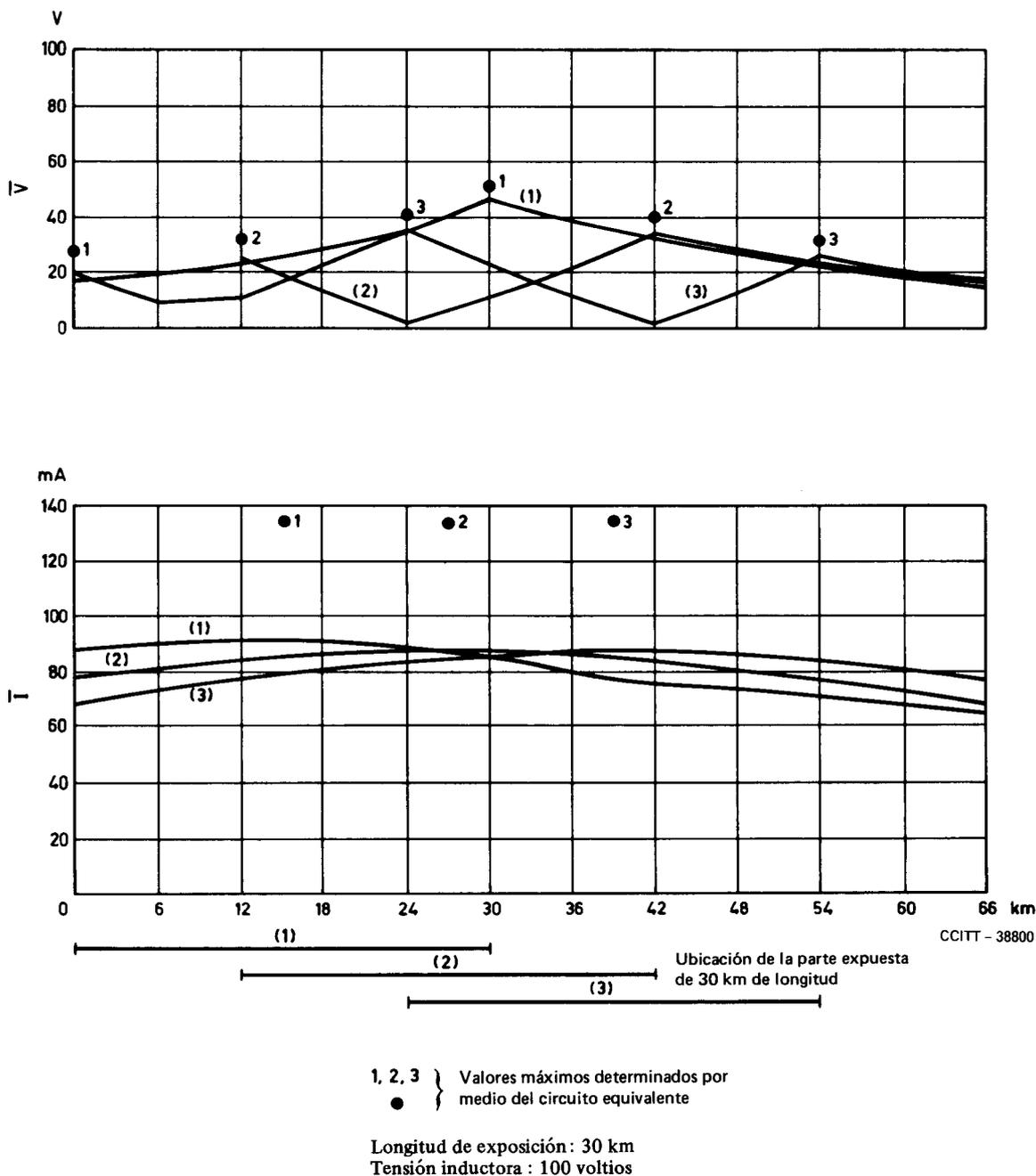


FIGURA C-7/K.16

Tensiones y corrientes que aparecen en una ruta de 300 canales en el caso de exposiciones asimétricas (conductor exterior de los pares coaxiales conectado a tierra)

### Referencias

- [1] KEMP (J.), SILCOOK (H.W.), STEWARD, (C.J.): Power frequency induction on coaxial cables with application to transistorized systems, *Electrical Communication*, Vol. 40, N.º2, pp. 255-266, 1965. (Igual texto en francés en: *Revue des Télécommunications*, Vol. 40, N.º2, pp. 254-263, 1965).
- [2] SALZMANN (W.), VOGEL (W.): Berechnung der Starkstrombeeinflussung von Nachrichtenkabeln mit Koaxialpaaren und isolierten Aussenleitern. (Cálculo de la interferencia producida por líneas eléctricas en los cables de telecomunicación con pares coaxiales y conductores exteriores aislados), *Signal und Draht* 57, N.º 12, pp. 205-211, 1965.

### Bibliografía

- KEMP (J.): Estimating voltage surges on buried coaxial cables struck by lightning, *Electrical Communication*, Vol. 40, N.º 3, pp. 381-385, 1965. (Igual texto en francés en: *Revue des Télécommunications*, Vol. 40, N.º 3, pp. 398-402, 1965).
- POPP (E.): Lightning protection of line repeaters, *Conference Proceedings, ICC 68 of the IEEE*, pp. 169-174.