

MATERIAL DE APOYO PARA LAS
INFORMACIONES TECNICAS SUMINISTRADAS

METODO DE CALCULO ESTIMATIVO
DE LA
INDUCCION EN LA COMUNICACION
EN EL SISTEMA DE
ALIMENTACION DIRECTA DE ENERGIA

Setiembre de 1988

INSTITUTO PARA COOPERACION INTERNACIONAL
AGENCIA DE COOPERACION INTERNACIONAL DEL JAPON

IFIC
JR
88-26

LIBRARY

JICA LIBRARY



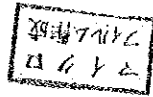
1074477E9J

19214

METODO DEL CALCULO ESTIMATIVO
DE LA
INDUCCION EN LA COMUNICACION
EN EL SISTEMA DE
ALIMENTACION DIRECTA DE ENERGIA

Septiembre de 1988

AGENCIA DE COOPERACION INTERNACIONAL DEL JAPON



PREFACIO

Los especialistas para la cooperación técnica que la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) despacha a los países en desarrollo, vienen dedicando constantemente sus esfuerzos y sus habilidades para cumplir la transferencia de tecnología apropiada, basada en sus propios conocimientos y tecnologías especializadas. Sin embargo, las condiciones locales que rodean a los especialistas en los países en desarrollo, tienden a diversificarse, abarcando temas cada vez más complejos y extensos. Esto obliga a que sea imprescindible la recopilación e investigación de las informaciones más recientes o las informaciones relativas con mayor amplitud y profundidad para que puedan satisfacer las exigencias de la asistencia técnica adecuada y precisa.

Teniendo en consideración esta situación y contemplando el problema de los países en desarrollo que afrontan enormes dificultades para obtener las suficientes informaciones técnicas, el Instituto para Cooperación Internacional desarrolla las actividades de apoyo, suministrando las informaciones técnicas necesarias para que los especialistas despachados por JICA puedan desempeñar sus funciones.

El presente documento ha sido preparado a pedido de los especialistas Ingenieros MICHIO FUKUSHIMA y YOSHITO YAMOTO despachados a México que actualmente prestan la asistencia técnica con respecto a la electrificación de los ferrocarriles. El mismo ha sido confeccionado con la idea de que sirva como material de referencia para poder realizar los cálculos estimativos de la inducción y tomar las medidas precisas contra las perturbaciones de la inducción de la comunicación que afectan a diversas clases de instalaciones de comunicación en las inmediaciones de las vías férreas, las cuales se estiman han de generarse con motivo de la electrificación de corriente alterna por el sistema de alimentación directa a las líneas ferroviarias que actualmente está promoviendo México.

Nos sentiríamos sumamente felices, si el presente documento pudiera servir de utilidad como información de referencia para resolver problemas similares que puedan aparecer.

Setiembre de 1988

KIYOSHI KATO
Director

Instituto para Cooperación Internacional
Agencia de Cooperación Internacional del Japón

INDICE

	Página
1. Electrificación de CA y perturbaciones de inducción	1
2. Estudios	5
3. Cálculo estimativo de la inducción en el sistema de alimentación directa	9
4. Valores utilizados para el cálculo estimativo de la inducción	30
5. Ejemplos del cálculo estimativo	69
6. Medidas contra la inducción	76

METODO DE CALCULO ESTIMATIVO DE LA INDUCCION EN LA COMUNICACION EN EL SISTEMA DE ALIMENTACION DIRECTA DE ENERGIA

1. Electrificación de CA y perturbaciones de inducción

Al realizar la electrificación de CA de los ferrocarriles, se produce la inducción electrostática y electromagnética sobre las líneas de comunicación que recorren paralelamente en las proximidades de las líneas ferroviarias electrificadas, causadas por la alta tensión y las grandes intensidades de corriente de las líneas catenarias. Es decir, una parte de la gran energía eléctrica de las líneas electrificadas, aparece en el sistema de comunicaciones.

Como acción inductiva de las líneas catenarias electrificadas (circuito de alimentación) que puede ejercerse sobre el sistema de comunicaciones, pueden concebirse los riesgos sobre el cuerpo humano, los daños y errores de operación de los equipos de comunicaciones, las perturbaciones por los ruidos en las comunicaciones telefónicas, etc.

Para reducir estas perturbaciones de la inducción, es necesario que se realicen los análisis por el lado de las líneas electrificadas (lado inductor) y el lado del sistema de comunicaciones (lado inducido), efectuar los cálculos estimativos de la inducción, determinar la existencia de las perturbaciones de inducción y tomar las medidas de prevención de inducción que sean técnicamente y económicamente apropiadas tanto en el lado de las líneas electrificadas como en el lado de las comunicaciones.

(1) Generalidades de la inducción

Por los efectos de la inducción de las líneas ferroviarias electrificadas con CA, se produce la tensión de inducción electrostática y la tensión de inducción electromagnética.

- (i) La tensión de inducción electrostática se produce por la capacitancia electrostática (C) entre las líneas catenarias y las líneas de comunicación, apareciendo una alta tensión de inducción electrostática en las líneas de comunicación de alambre desnudo con una distancia de separación corta entre la línea catenaria y la línea de comunicación.

Cuando la línea de comunicación de alambre desnudo fuera larga y el cuerpo humano haga contacto con esta línea de comunicación de alambre desnudo, es peligroso por existir una corriente de inducción electrostática grande.

Sin embargo, cuando la distancia de separación entre la línea catenaria y la línea de comunicación fuera grande, se reduce rápidamente la tensión de inducción electrostática y se reducen los efectos de la inducción electrostática. Además, en el caso de los cables de comunicación con capa de blindaje puesta a tierra, la tensión de inducción electrostática es prácticamente nula.

- (ii) La tensión de inducción electromagnética se produce por la inductancia mutua (M) entre la línea catenaria, los rieles y la línea de comunicación y aparecen notablemente los efectos de la conductividad de la tierra.

Cuando la conductividad de la tierra es grande (por ejemplo en los llanos de estratos aluviales), la inductancia mutua M es pequeña y se reduce la tensión de inducción electromagnética. Asimismo, cuando la conductividad de la tierra fuera pequeña (por ejemplo en zonas montañosas de roca), la inductancia mutua M es grande y aumenta la tensión de inducción electromagnética.

Aunque la tensión de inducción electromagnética es enormemente influenciado por la conductividad de la tierra según lo mencionado anteriormente, los efectos de la conductividad de la tierra son aún más grandes cuando la distancia de separación entre las líneas catenarias y la línea de comunicación fuera grande.

Por esta razón, para calcular la tensión de inducción electromagnética, es necesario que se obtenga el valor de la conductividad de la tierra mediante las mediciones prácticas.

Por otra parte, debido a que la tensión de inducción electromagnética no disminuye tanto como la tensión de inducción electrostática aunque se aumente la distancia de separación entre las líneas catenarias y la línea de comunicación, el alcance de los efectos de la inducción electromagnética es mayor que en el caso de la inducción electrostática.

Además, debido a que la tensión de inducción electromagnética se incrementa proporcionalmente a la longitud de la línea de comunicación, se incrementa la tensión de inducción electromagnética de las líneas de comunicación de larga distancia.

(iii) Valor de límite

Aunque existen algunas variaciones en los valores de límite de la tensión de inducción y la tensión de ruidos según los países, de acuerdo con las recomendaciones de CCITT (Comité Consultivo Internacional Telegráfico y Telefónico) se fijan los siguientes valores para las líneas ferroviarias eléctricas.

Tensión de inducción para las operaciones normales del vehículo ferroviario	60 V
Tensión de inducción peligrosa por falla de cortocircuito	430 V
Tensión de ruido de inducción	1 mV
Corriente de inducción electrostática	15 mA

Además, con respecto al valor de límite de la tensión de ruido de inducción, existen unos países que adoptan el valor de 2 mV para los cables de comunicación y 5 mV para las líneas desnudos, en virtud de que la tensión de ruido de inducción se produce en los ferrocarriles eléctricos solamente durante la operación del vehículo ferroviario. También existen unos países que fijan en 300 V el valor de límite de la tensión de inducción peligrosa para avería.

Más aún, existen algunos países que adopta el valor de límite de 150 V como valor de límite de la tensión de inducción electrostática y 10 mA como valor de límite de la corriente de inducción electrostática.

2. Estudios

Como estudios para realizar el cálculo estimativo de la inducción, se han previsto de los siguientes.

(i) Estudios de las líneas electrificadas

(a) Por clase de vías ferroviarias

Por vías simples y vías dobles
Por vías elevadas, vías en túneles, etc.
Por pendiente de las vías

(b) Instalaciones de alimentación de energía

Ubicación de las subestaciones, puesto de seccionamiento, etc.

Transformador de alimentación y la impedancia del lado de la fuente de energía, etc.

Tipo de línea, impedancia, etc. de las líneas catenarias, rieles, conductor de tierra, etc.

De acuerdo con estos datos, se elaborarán el diagrama del circuito de alimentación y el diagrama de disposición de los postes de alimentación de energía.

(ii) Estudio de la conductividad de la tierra

Se medirá con una separación de medición de 5 - 10 km.

(iii) Estudio de la distancia de separación de la línea de comunicación

Se estudiará la distancia de separación de las líneas de comunicación (internos del ferrocarril y perteneciente a otros organismos) existentes desde el centro

de la vía de la línea ferroviaria que se electrifique (en un ancho de 500 m) y se elaborará el plano de distancia.

(a) Método de instalación

Aéreo, enterrado, conductos, etc.

(b) Por clase de líneas de comunicaciones

Cantidad de hilos de alambres desnudos, clase de cable (con o sin capa de blindaje), cantidad de pares, grado de equilibrio, etc.

(c) Por clase de conmutadores

Por conmutador automático, de batería común, a magneto, grado de equilibrio, etc.

(d) Por clase de circuito

Circuito telefónico, telegráfico, de ondas portadoras, etc.

Se inscribirán estos datos en el plano de separación.

(iv) Corriente de carga, corriente perturbadora equivalente del vehículo ferroviario.

(a) Corriente de carga

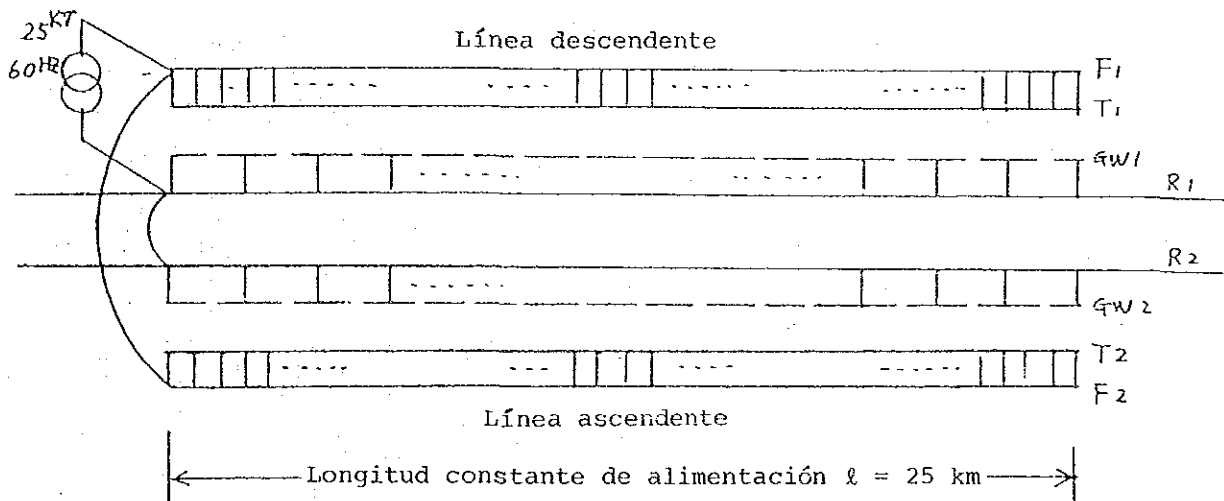
Se calculará sobre la base de las curvas de operación del vehículo ferroviario, etc.

(b) Corriente perturbadora equivalente

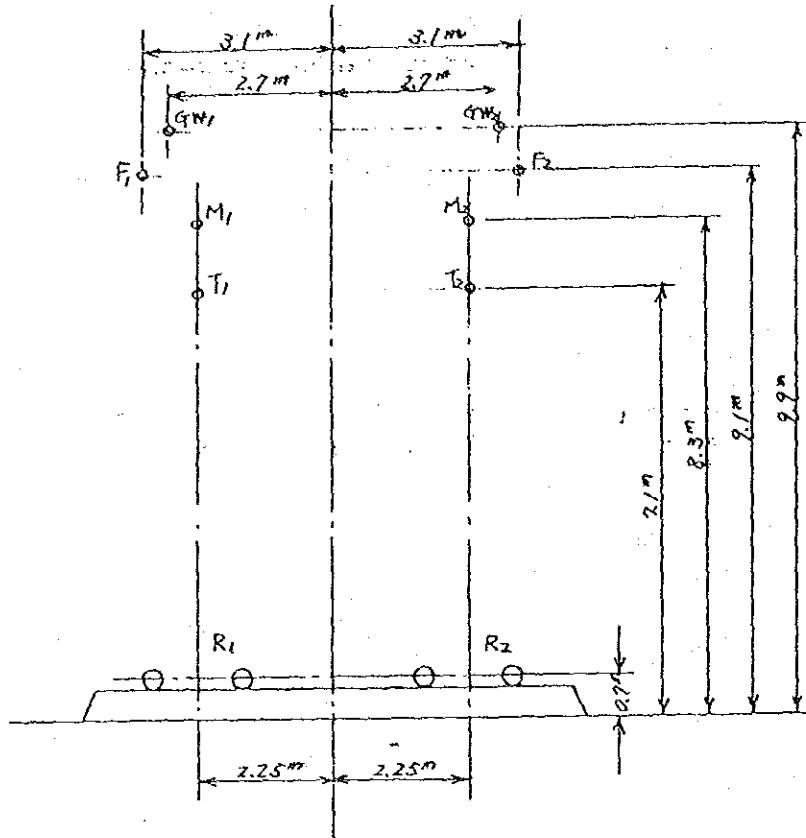
Se obtendrá del valor de medición práctica de operación de vehículos ferroviarios o los valores de diseño, etc.

Circuito de alimentación de energía y disposición de los postes para el sistema de alimentación directa entre México - Querétaro

Circuito de alimentación de energía y disposición de los postes de alimentación y clase de líneas según el cálculo estimativo



Disposición de postes del sistema de alimentación directa de México



Clase	Material	Radio (mm)	Resistencia del conductor (Ω/km)	Flecha de la línea (mm)
Línea de contacto T_1, T_2	Alambre de cobre duro	6,12	0,1695	—
Línea de sostèn M_1, M_2	Alambre de cobre duro	5,75	0,228	900
Línea de alimentación F_1, F_2	Alambre de cobre duro	8,0	0,124	900
Conductor de tierra GW_1, GW_2	Cable de aluminio con alma de acero	6,25	0,457	900
Riel R_1, R_2	68 kg/m			

3. Cálculo estimativo de la inducción en el sistemas de alimentación directa

(1) Cálculo de la tensión de inducción

El cálculo de la tensión de inducción permanente V_m que se produce durante la operación de los vehículos ferroviarios, se obtiene de la fórmula (3.1) cuando la distancia de separación entre la línea catenaria y la línea de comunicación fuera grande (más de aprox. 30 m) y de la fórmula (3.2) y la fórmula (3.3) cuando la distancia de separación fuera pequeña (menos de aprox. 30 m).

(i) Cuando la distancia de separación fuera grande

La tensión de inducción V_m se calcula con la siguiente fórmula

$$V_m = \omega M \cdot I_p (1-n) \cdot l \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \times 10^{-6} \text{ (V) .. (3.1)}$$

Donde,

$$\omega = 2\pi f$$

f : Frecuencia (60 Hz)

I_p : Corriente de carga durante la operación del vehículo ferroviario (A)

$1-n$: Coeficiente de blindaje por el riel y el alambre de tierra (Ver los Cuadros 4.2 - 4.5 y Fig. 4.7 y Fig. 4.8)

M : Inductancia mutua entre la línea catenaria y la línea de comunicación con una frecuencia de 60 Hz ($\mu\text{H}/\text{km}$) (Ver la Fig. 4.4)

ℓ : Longitud de exposición paralela del circuito de alimentación y la línea de comunicación (km)

K_1 : Coeficiente de blindaje de la línea de comunicación a 60 Hz (Ver Cuadro 4.6)

K_2 : Coeficiente de blindaje de la línea de apantallamiento (Ver el Cuadro 4.8)

K_3 : Coeficiente de blindaje de obras vías (Ver el Cuadro 4.9, Fig. 4.17 - Fig. 4.20)

K_4 : Coeficiente de blindaje del túnel (Ver el Cuadro 4.10)

K_5 : Coeficiente de blindaje de la vía elevada (Ver el Cuadro 4.11)

K_6 : Coeficiente de blindaje por la corriente de derivación de la corriente del riel (Ver el Cuadro 4.12)

(ii) En el caso de que la distancia de separación fuera pequeña

(a) En el caso de vía simple

La tensión de inducción V_m se obtiene con la fórmula (3.2).

$$V_m = \omega I_P \cdot (\alpha_1 M_{TC} + \beta_1 M_{FC} - n_1 M_{RC} - m_1 M_{GC}) \cdot \ell \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \times 10^{-6} \text{ (V)} \dots\dots\dots (3.2)$$

Donde,

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= I_T/I_P, & \beta_1 &= I_F/I_P \\ n_1 &= I_R/I_P, & m_1 &= I_G/I_P = 0 \end{aligned} \right\} \text{ (Ver Cuadro 4.2)}$$

- I_T : Corriente de la línea de contacto (A)
 I_F : Corriente de la línea de alimentación (A)
 I_R : Corriente del riel (A)
 I_G : Corriente del alambre de tierra (A) $I_G = 0$
 I_p : Corriente de carga del vehículo ferroviario (A)
 M_{TC} : Inductancia mutua entre la línea de contacto y la línea de comunicación ($\mu\text{H}/\text{km}$)
 M_{FC} : Inductancia mutua entre la línea de alimentación y la línea de comunicación ($\mu\text{H}/\text{km}$)
 M_{RC} : Inductancia mutua entre el riel y la línea de comunicación ($\mu\text{H}/\text{km}$)
 M_{GC} : Inductancia mutua entre el alambre de tierra y la línea de comunicación ($\mu\text{H}/\text{km}$)
 ℓ : Longitud de exposición paralela entre el circuito de alimentación y la línea de comunicación (km)
 $K_1 - K_6$: Coeficiente de blindaje mencionado anteriormente

Con excepción de $K_1 - K_6$, en las Fig. 4.9 y 4.10 se indican las tensiones de inducción obtenidas con la fórmula (3.2) suponiendo que la corriente de carga fuera de $I_p = 1 \text{ A}$ y la longitud de exposición paralela de la línea de comunicación fuera $\ell = 1 \text{ km}$.

Utilizando las Fig. 4.9 y 4.10, se obtiene la tensión de inducción V_m .

(b) En el caso de vía doble

La tensión de inducción V_m se obtiene con la fórmula (3.3).

$$V_m = \omega I_P \cdot (\alpha M_{T1C} + \beta M_{F1C} - n_1 M_{R1C} - n_2 M_{R2C} - m_1 M_{G1C} - m_2 M_{G2C}) \cdot l \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \times 10^{-6} \text{ (V) .. (3.3)}$$

Donde,

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= I_{T1}/I_P, & \beta &= I_{F1}/I_P \\ n_1 &= I_{R1}/I_P, & n_2 &= I_{R2}/I_P \\ m_1 &= I_{G1}/I_P = 0, & m_2 &= I_{G2}/I_P = 0 \end{aligned} \right\} \text{(Ver el Cuadro 4.4)}$$

I_{T1} : Corriente de la línea de contacto del lado de la carga del vehículo ferroviario (A)

I_{F1} : Corriente de la línea de alimentación del lado de la carga del vehículo ferroviario (A)

I_{R1} : Corriente del riel del lado de la carga del vehículo ferroviario (A)

I_{G1} : Corriente del alambre de tierra del lado de la carga del vehículo ferroviario (A) $I_{G1} = 0$

I_{R2} : Corriente eléctrica del riel del lado que no tenga la carga del vehículo ferroviario (A)

I_{G2} : Corriente eléctrica del alambre de tierra que no tenga la carga del vehículo ferroviario (A) $I_{G2} = 0$

I_P : Corriente de carga del vehículo ferroviario (A)

M_{T1C} : Inductancia mutua entre la línea de contacto del lado de la carga del vehículo ferroviario y la línea de comunicación ($\mu\text{H}/\text{km}$)

- M_{F1C} : Inductancia mutua entre la línea de alimentación del lado de la carga del vehículo ferroviario y la línea de comunicación ($\mu\text{H}/\text{km}$)
- M_{R1C} : Inductancia mutua entre el riel del lado de la carga del vehículo ferroviario y la línea de comunicación ($\mu\text{H}/\text{km}$)
- M_{G1C} : Inductancia mutua entre el alambre de tierra del lado de la carga del vehículo ferroviario y la línea de comunicación ($\mu\text{H}/\text{km}$)
- M_{R2C} : Inductancia mutua entre el riel del lado que no tenga la carga del vehículo ferroviario y la línea de comunicación ($\mu\text{H}/\text{km}$)
- M_{G2C} : Inductancia mutua entre la línea de tierra del lado que no tenga la carga del vehículo ferroviario y la línea de comunicación ($\mu\text{H}/\text{km}$)
- ℓ : Longitud de exposición paralela entre el circuito de alimentación y la línea de comunicación (km)
- $K_1 - K_6$: Coeficiente de blindaje mencionado anteriormente

Con excepción de $K_1 - K_6$, en las Fig. 4.13 y 4.14 se indican las tensiones de inducción obtenidas con la fórmula (3.3) suponiendo que la corriente de carga fuera de $I_p = 1 \text{ A}$ y la longitud de exposición paralela de la línea de comunicación fuera $\ell = 1 \text{ km}$.

Utilizando las Fig. 4.13 y 4.14, se obtiene la tensión de inducción V_m .

Además, en el caso de calcular la tensión de inducción V_m de la línea de comunicación, debe procederse como sigue.

- a. Cuando se opere la carga de una cantidad plural de vehículos ferroviarios dentro de un tramo de alimentación, debe calcularse la tensión de inducción debida a la carga de cada vehículo ferroviario y se totalizan (suma matemática) las tensiones de inducción producidas por las cargas de una cantidad plural de los respectivos trenes.
- b. Asimismo, la tensión de inducción por la carga de los vehículos ferroviarios de la línea ascendente y la línea descendente, se totalizan (suma matemática) las tensiones de inducción debida a la carga del vehículo ferroviario de la línea ascendente y la carga del vehículo ferroviario de la línea descendente.
- c. La tensión de inducción del caso de que la línea de comunicación se extienda de un tramo de alimentación hacia el tramo de alimentación adyacente según se indica en la Fig. 3.1, es necesario que se calcule tomando en consideración la diferencia de fase (120°) de la tensión de alimentación entre los tramos de alimentación adyacentes y la dirección de la corriente de carga del vehículo ferroviario.

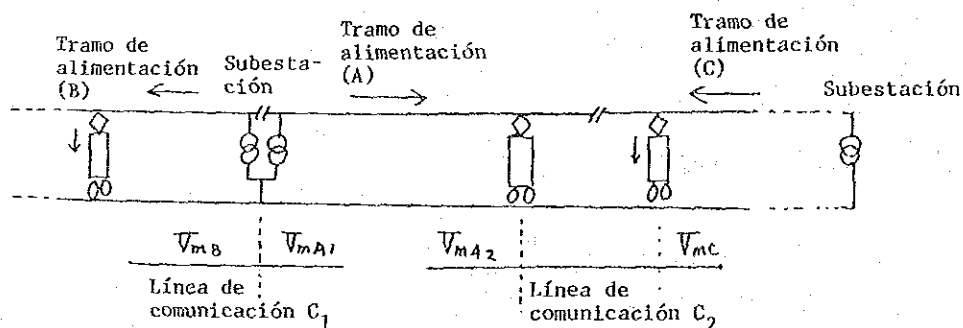


Fig. 3.1 En el caso de que la línea de comunicación se extienda entre los tramos de alimentación adyacentes

La tensión de inducción V_m del caso de la línea de comunicación C_1 que se indica en la Fig. 3.1, se calcula obteniendo la tensión de inducción $V_{m_{A1}}$ debido al circuito de alimentación (A) y la tensión de inducción V_{m_B} debido al circuito de alimentación (B) de la siguiente fórmula.

$$V_m = V_{m_{A1}} + V_{m_B} \angle 60^\circ$$

Con respecto a la línea de comunicación C_2 , se calcula obteniendo la tensión de inducción $V_{m_{A1}}$ debido al circuito de alimentación (A) y la tensión de inducción V_{m_C} debido al circuito de alimentación (B) de la siguiente fórmula.

$$V_m = V_{m_{A1}} + V_{m_C} \angle 60^\circ$$

- (2) Cálculo de la tensión de inducción peligrosa V_f para avería

Para calcular la tensión de inducción peligrosa para avería, se calcula utilizando la fórmula (3.4) cuando la distancia de separación entre el circuito de alimentación y la línea de comunicación fuera grande.

Asimismo, cuando la distancia de separación fuera pequeña, se calcula con la fórmula (3.5) y la fórmula (3.6).

- (i) En el caso de que la distancia de separación fuera grande

$$V_f = \omega M I_f (1-n) \cdot l \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \times 10^{-6} \text{ (V) .. (3.4)}$$

Donde,

I_f : Corriente para avería (A) (Ver la fórmula (3.7) y la Fig. 4.6)

l : Longitud de exposición paralela del circuito de alimentación y la línea de comunicación (km)

(ii) En el caso de que la distancia de separación fuera pequeña

(a) En el caso de vía simple

$$V_f = \omega I_f \cdot (\alpha_1 M_{TC} + \beta_1 M_{FC} - n_1 M_{RC} - m_1 M_{GC}) \cdot l \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \times 10^{-6} \text{ (V) } \dots \dots \dots (3.5)$$

Donde,

I_f : Corriente para avería (A)

l : Longitud de exposición paralela del circuito de alimentación y la línea de comunicación (km)

La tensión de inducción cuando la corriente para avería fuera de 1 A y la longitud de exposición paralela de la línea de comunicación sea de 1 km, se obtiene la tensión de inducción peligrosa V_f para avería, utilizando la Fig. 4.9 y la Fig. 4.10.

(b) En el caso de vía doble

$$V_f = \omega I_f \cdot (\alpha M_{T1C} + \beta M_{F1C} - n_1 M_{R1C} - n_2 M_{R2C} - m_1 M_{G1C} - m_2 M_{G2C}) \cdot l \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \times 10^{-6} \text{ (V) } \dots \dots (3.6)$$

Donde,

I_f : Corriente para avería (A)

ℓ : Longitud de exposición paralela del circuito de alimentación y la línea de comunicación (km)

En el caso de la vía doble, la tensión de inducción cuando la corriente para avería fuera de 1 A y la longitud de exposición paralela de la línea de comunicación sea de 1 km, se obtiene la tensión de inducción peligrosa V_f para avería, utilizando la Fig. 4.13 y la Fig. 4.14.

Además, debido a que GW_1 y GW_2 no están conectados longitudinalmente, resulta

$$I_{G1} = 0, \quad I_{G2} = 0$$

En consecuencia, resulta

$$m_1 = 0, \quad m_2 = 0$$

(3) Cálculo de la corriente para avería

Con respecto a la corriente para avería, se calcula la corriente para avería a tierra de la línea catenaria entre los respectivos puntos de la subestación y seccionamiento del tramo de alimentación.

Para obtener la corriente para avería, se calcula con la fórmula (3.7).

$$I_f = \frac{E}{Z_{ss} + Z_t + Z_\ell} \quad (\text{A}) \dots\dots\dots (3.7)$$

Donde,

E : Tensión de la línea catenaria del circuito de alimentación (V)

Z_{ss} : Impedancia del lado de la fuente de energía que se recibe en la subestación (Ω)

Z_t : Impedancia del transformador de alimentación de la subestación (Ω)

Z : Impedancia del circuito de alimentación (Ω/km)

l : Distancia entre la subestación y los respectivos puntos de cortocircuito (km)

Además, Z_{ss} , Z_t y Z se calcula con la siguiente fórmula.

$$Z_{ss} = j \frac{20 \cdot (E_{kv})^2 \cdot P_{ss}}{\text{Tensión de referencia kVA}} \quad (\Omega)$$

$$Z_t = j \frac{10 \cdot (E_{kv})^2 \cdot P_t}{\text{Tensión de régimen kVA}} \quad (\Omega)$$

Donde,

P_{ss} : Porcentaje de Z del lado de la fuente de energía

P_t : Porcentaje de Z del transformador para alimentación de la subestación

La impedancia Z del circuito de alimentación para el caso de vías dobles se calcula por la siguiente fórmula.

$$Z \doteq \alpha Z_{T1} + \beta Z_{T1F1} - n_1 Z_{T1R1} - n_2 Z_{T1R2} - m_1 Z_{T1G1} - m_2 Z_{T1G2}$$

Donde,

$$\alpha = I_{T1}/I, \beta = I_{F1}/I, n_1 = I_{R1}/I, n_2 = I_{R2}/I$$

$$m_1 = I_{G1}/I = 0, \quad m_2 = I_{G2}/I = 0$$

$$I = I_{T1} + I_{F1} : \text{Corriente de cortocircuito (A)}$$

I_{T1} : Corriente de la línea de contacto (T_1 del lado que ocurre la avería) (A)

I_{F1} : Corriente de la línea de alimentación (F_1 del lado que ocurre la avería) (A)

I_{R1} : Corriente del riel (R_1 del lado que ocurre la avería) (A)

I_{R2} : Corriente del riel (R_2 del lado que no ocurre la avería) (A)

I_{G1} : Corriente del alambre de tierra (G_1 del lado que ocurre la avería) (A)

I_{G2} : Corriente del alambre de tierra (G_2 del lado que no ocurre la avería) (A)

Z_{T1} : Impedancia propia del T_1 de la línea de contacto (Ω/km)

Z_{T1F1} : Impedancia mutua entre T_1 de la línea de contacto del lado que ocurre la avería y F_1 de la línea de alimentación del lado que ocurre la avería (Ω/km)

Z_{T1R1} : Impedancia mutua entre T_1 de la línea de contacto del lado que ocurre la avería y R_1 del riel del lado que ocurre la avería (Ω/km)

Z_{T1G1} : Impedancia mutua entre T_1 de la línea de contacto del lado que ocurre la avería y G_1 del alambre de tierra del lado que ocurre la avería (Ω/km)

Z_{T1R2} : Impedancia mutua entre T_1 de la línea de contacto del lado que ocurre la avería y R_2 del riel del lado que no ocurre la avería (Ω/km)

Z_{T1G2} : Impedancia mutua entre T_1 de la línea de contacto del lado que ocurre la avería y G_2 del alambre de tierra del lado que no ocurre la avería (Ω/km)

En el Cuadro 4.1 se indican los valores del cálculo de Z con respecto a la disposición normal de los postes del circuito de alimentación entre México - Querétaro.

Asimismo, como un ejemplo, se indica en la Fig. 4.6 el valor de cálculo de la corriente para avería cuando se haya aplicado el valor Z_{ss} y Z_t . La impedancia propia y la impedancia mutua se calcula por la fórmula de Carson-Pollaczek.

(4) Cálculo de la tensión del ruido de inducción

El cálculo de la tensión del ruido de inducción V_n que se produce en el circuito de comunicación, se realiza con la fórmula (3.8) cuando la distancia de separación entre el circuito de alimentación y la línea de comunicación fuera grande (más de aprox. 30 m).

Asimismo, cuando la distancia de separación fuera pequeña (menos de aprox. 30 m), se calcula con la fórmula (3.9) o la fórmula 3.10).

(i) En el caso de que la distancia de separación fuera grande

$$V_n = \omega_{800} \cdot M_{800} \cdot J_P \cdot (1-n) \cdot l \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot \lambda \times 10^{-3} \text{ (mV)} \dots\dots\dots (3.8)$$

Donde,

$$\omega_{800} = 2\pi \cdot f \quad f = 800 \text{ Hz}$$

M_{800} : Impedancia mutua para la distancia de separación entre la línea catenaria y la línea de comunicación a 800 Hz ($\mu\text{H}/\text{km}$) (Ver la Fig. 4.5)

J_p : Corriente perturbadora equivalente (A)

$l-n$: Coeficiente de blindaje por el riel y el alambre de tierra a 800 Hz (Ver el Cuadro 4.3 y 4.5)

l : Longitud de exposición paralela entre la línea catenaria y la línea de comunicación (km)

K_1 : Coeficiente de blindaje de la línea de comunicación a 800 Hz (Ver el Cuadro 4.6)

K_2 : Coeficiente de blindaje de la línea de apantallamiento (Ver el Cuadro 4.8)

K_3 : Coeficiente de blindaje de otras vías (Ver el Cuadro 4.9)

K_4 : Coeficiente de blindaje del túnel (Ver el Cuadro 4.10)

K_5 : Coeficiente de blindaje de la vía elevada (Ver el Cuadro 4.11)

K_6 : Coeficiente de blindaje por la corriente de derivación de la corriente del riel (Ver el Cuadro 4.13)

λ : Grado de equilibrio del circuito de comunicación (Ver el Cuadro 4.7)

(ii) En el caso de que la distancia de separación fuera pequeña

(a) En el caso de vía simple

La tensión del ruido de inducción V_n se calcula con la fórmula (3.9).

$$V_n = \omega_{800} \cdot J_P \cdot (\alpha_1 M_{TC} + B_1 M_{FC} - n_1 M_{RC} - m_1 M_{GC}) \cdot \ell \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot \lambda \times 10^{-3} \text{ (mV) } \dots \dots (3.9)$$

Donde,

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= J_{PT}/J_P, & B_1 &= J_{PF}/J_P, \\ n_1 &= J_{PR}/J_P, & m_1 &= J_{PG}/J_P = 0 \end{aligned} \right\} \text{ Ver el Cuadro 4.3}$$

J_{PT} : Corriente de J_P que fluye por la línea de contacto (A)

J_{PF} : Corriente de J_P que fluye por la línea de alimentación (A)

J_{PR} : Corriente de J_P que fluye por el riel (A)

J_{PG} : Corriente de J_P que fluye por el alambre de tierra (A) $J_{PG} = 0$

J_P : Corriente perturbadora equivalente que fluye desde el vehículo ferroviario (A)

M_{TC} : Impedancia mutua entre la línea de contacto a 800 Hz y la línea de comunicación ($\mu\text{H}/\text{km}$)

M_{FC} : Impedancia mutua entre la línea alimentación a 800 Hz y la línea de comunicación ($\mu\text{H}/\text{km}$)

M_{RC} : Impedancia mutua entre el riel a 800 Hz y la línea de comunicación ($\mu\text{H}/\text{km}$)

M_{GC} : Impedancia mutua entre el alambre de tierra a 800 Hz y la línea de comunicación ($\mu\text{H}/\text{km}$)

ℓ : Longitud de exposición paralela del circuito de alimentación y la línea de comunicación (km)

λ : Grado de equilibrio del circuito de comunicación (Ver el Cuadro 4.7)

Con excepción del coeficiente de blindaje $K_1 - K_6$ y el grado de equilibrio del circuito de comunicación λ , en las Fig. 4.11 y 4.12 se indican las tensiones del ruido de inducción V_n obtenidas con la fórmula (3.9) suponiendo que la corriente de carga fuera $J_P = 1$ A y la longitud de exposición paralela fuera $\ell = 1$ km.

Para obtener la tensión del ruido de inducción V_n a partir de V_n (V) de las Fig. 4.11 y 4.12, se calcula por la siguiente fórmula.

$$V_n = V_n \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot J_P \cdot \ell \cdot \lambda \times 10^{-3} \text{ (mV)}$$

(b) En el caso de vía doble

La tensión del ruido de inducción V_n se calcula por la fórmula (3.10).

$$V_n = \omega_{800} \cdot J_P \cdot (\alpha M_{T1C} + \beta M_{F1C} - n_1 M_{R1C} - n_2 M_{R2C} - m_1 M_{G1C} - m_2 M_{G2C}) \cdot \ell \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot \lambda \times 10^{-3} \text{ (mV)} \dots \dots \dots (3.10)$$

Donde,

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= J_{PT1}/J_P, & \beta &= J_{PF1}/J_P, \\ n_1 &= J_{PR1}/J_P, & n_2 &= J_{PG2}/J_P \\ m_1 &= J_{PG1}/J_P = 0, & m_2 &= J_{PG2}/J_P = 0 \end{aligned} \right\} \text{ Ver el Cuadro 4.5}$$

- J_{PT1} : Valor de J_P que fluye por la línea de contacto del lado de la carga del vehículo ferroviario (A)
- J_{PF1} : Valor de J_P que fluye por la línea de alimentación del lado de la carga del vehículo ferroviario (A)
- J_{PR1} : Valor de J_P que fluye por el riel del lado de la carga del vehículo ferroviario (A)
- J_{PG1} : Valor de J_P que fluye por el alambre de tierra del lado de la carga del vehículo ferroviario (A) $J_{PG1} = 0$
- J_{PR2} : Valor de J_P que fluye por el riel del lado que no existe la carga del vehículo ferroviario (A)
- J_{PG2} : Valor de J_P que fluye por el alambre de tierra del lado que no existe la carga del vehículo ferroviario (A) $J_{PG2} = 0$
- J_P : Corriente perturbadora equivalente que fluye desde el lado de la carga del vehículo ferroviario (A)
- M_{T1C} : Impedancia mutua entre la línea de contacto del lado de la carga a 800 Hz y la línea de comunicación ($\mu\text{H}/\text{km}$)
- M_{F1C} : Impedancia mutua entre la línea alimentación del lado de la carga a 800 Hz y la línea de comunicación ($\mu\text{H}/\text{km}$)
- M_{R1C} : Impedancia mutua entre el riel del lado de la carga a 800 Hz y la línea de comunicación ($\mu\text{H}/\text{km}$)
- M_{G1C} : Impedancia mutua entre el alambre de tierra del lado de la carga a 800 Hz y la línea de comunicación ($\mu\text{H}/\text{km}$)

M_{R2C} : Impedancia mutua entre el riel del lado que no tiene la carga a 800 Hz y la línea de comunicación ($\mu\text{H}/\text{km}$)

M_{G2C} : Impedancia mutua entre el alambre de tierra del lado que no tiene la carga a 800 Hz y la línea de comunicación ($\mu\text{H}/\text{km}$)

ℓ : Longitud de exposición paralela del circuito de alimentación y la línea de comunicación (km)

Con excepción de $K_1 - K_6$ y el grado de equilibrio del circuito de comunicación λ , en las Fig. 4.15 y 4.16 se indican las tensiones del ruido de inducción V_n (V) obtenidas con la fórmula (3.10) suponiendo que la corriente de carga fuera de $J_p = 1$ A y la longitud de exposición paralela fuera $\ell = 1$ km.

Para obtener la tensión del ruido de inducción V_n a partir de las Fig. 4.15 y 4.16, se calcula por la siguiente fórmula.

$$V_n = V_n \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot J_p \cdot \ell \cdot \lambda \times 10^{-3} \text{ (mV)}$$

Además, en el caso de calcular la tensión del ruido de inducción V_n de la línea de comunicación, se procederá como sigue.

- a. Cuando se opere la carga de una cantidad plural de vehículos ferroviarios dentro de un tramo de alimentación, debe calcularse la tensión del ruido de inducción debida a la carga de cada vehículo ferroviario y se totalizan (suma de potenciales (raíz cuadrática)) las tensiones del ruido de inducción producidas por las cargas de una cantidad plural de los respectivos vehículos ferroviarios.

- b. Asimismo, la tensión del ruido de inducción por la carga de los vehículos ferroviarios de la línea ascendente y la línea descendente, se totalizan (suma de potencia) las tensiones del ruido de inducción debida a la carga del vehículo ferroviario de la línea ascendente y la carga del vehículo ferroviario de la línea descendente.
- c. La tensión del ruido de inducción V_n en el caso de que la línea de comunicación se extienda desde un tramo de alimentación hasta el tramo de alimentación adyacente según se indica en la Fig. 3.1, se suman (suma de potencia) la tensión del ruido de inducción que se produce en un tramo de alimentación y la tensión del ruido de inducción que se produce en el tramo de alimentación adyacente.

(5) Tensión de inducción electrostática y corriente de inducción electrostática

(i) Cálculo de la tensión de inducción electrostática V_s

(a) En el caso de vía simple (T, R)

La tensión de inducción electrostática V_s que se produce en la línea de comunicación, se calcula con la siguiente fórmula.

$$V_s = \frac{1}{2 \log_e \frac{2h_T}{r_T}} \cdot \log_e \frac{b_{TC}^2 + (h_T + h_C)^2}{b_{TC}^2 + (h_T - h_C)^2} \cdot E \cdot k \text{ (V)}$$

..... (3.11)

Donde,

h_T : Altura de la línea de contacto (Conductor equivalente a la línea de sostén y la línea de catenaria) (m)

r_T : Radio de la línea de contacto (Conductor equivalente a la línea de sostén y la línea catenaria) (m)

b_{TC} : Distancia de separación entre la línea de contacto y la línea de comunicación (m)

h_C : Altura de la línea de comunicación (m)

E : Tensión de la línea catenaria (V)

k : Coeficiente de blindaje debido a las líneas de apantallamiento (Ver el Cuadro 4.14)

La fórmula de cálculo se torna complejo cuando además de la línea de contacto, existiera la línea de alimentación o el alambre de tierra o en el caso de vías dobles.

(b) En el caso de vía simple (T, F, R, GW)

La tensión de inducción electrostática V_s que se produce en la línea de comunicación, se calcula por la fórmula (3.12).

$$V_s = \frac{1}{\Delta} (\Delta_1 \cdot P_{TC} + \Delta_2 \cdot P_{FC} + \Delta_3 \cdot P_{GC}) \cdot E \cdot k \quad (V) \quad \dots\dots\dots (3.12)$$

Donde,

$$P_{ij} = \log_e \frac{b_{ij}^2 + (h_i + h_j)^2}{b_{ij}^2 + (h_i - h_j)^2}$$

b_{ij} : Distancia de separación entre el conductor i y el conductor j (m)

h_i, j_i : altura del conductor i y el conductor j (m)

$$\Delta = \begin{vmatrix} P_T & P_{TF} & P_{TG} \\ P_{FT} & P_F & P_{FG} \\ P_{GT} & P_{GF} & P_G \end{vmatrix} \quad \Delta 1 = \begin{vmatrix} 1 & P_{TF} & P_{TG} \\ 1 & P_F & P_{FG} \\ 0 & P_{GF} & P_G \end{vmatrix}$$

$$\Delta 2 = \begin{vmatrix} P_T & 1 & P_{TG} \\ P_{FT} & 1 & P_{FG} \\ P_{GT} & 0 & P_G \end{vmatrix} \quad \Delta 3 = \begin{vmatrix} P_T & P_{TF} & 1 \\ P_{FT} & P_F & 1 \\ P_{GT} & P_{GF} & 0 \end{vmatrix}$$

$$P_i = 2 \log_e \frac{2h_i}{r_i}$$

h_i : Altura del conductor i (m)

r_i : Radio del conductor i (m)

E : Tensión de la línea catenaria (V)

k : Coeficiente de blindaje de la línea de apantallamiento (Ver el Cuadro 4.14)

Al calcular con la fórmula (3.12) la tensión de inducción electrostática con respecto a la distancia de separación suponiendo que E = 25 kV, se obtiene la Fig. 4.21.

- (c) En el caso de vía doble ($T_1, F_1, R_1, GW_1, T_2, F_2, R_2, GW_2$)

Aunque el cálculo de la tensión de inducción electrostática Vs resulta más complejo que en el caso de vía simple, el resultado del cálculo es tal como se indica en la Fig. 4.22 suponiendo que E = 25 kV.

En cuanto a la tensión de inducción electrostática, se produce en el caso de los cables desnudos de comunicaciones o en los cables sin blindaje, mientras que en los cables con la capa de blindaje resulta prácticamente 0.

(ii) Cálculo de la corriente de inducción electrostática I_s

La corriente de inducción electrostática es la corriente de descarga que fluye por el cuerpo humano, cuando el cuerpo humano haga contacto con la línea de comunicación que esté produciendo la tensión de inducción electrostática, la cual se calcula por la fórmula (3.13).

$$I_s = \frac{\omega V_s \cdot l}{18 \log_e \frac{2h_c}{r_c}} \times 10^{-3} \quad (\text{mA}) \quad \dots\dots\dots (3.13)$$

Donde,

$$\omega = 2\pi f \quad f = 60 \text{ Hz}$$

V_s : Tensión de inducción electrostática (V)

l : Longitud de la línea de comunicación (km)

h_c : Altura de la línea de comunicación (m)

r_c : Radio de la línea de comunicación (m)

En la Fig. 4.23 se detalla los resultados del cálculo de la corriente de inducción electrostática en el caso que el diámetro de la línea de comunicación fuera 4 mm y 2,9 mm.

4. Valores utilizados para el cálculo estimativo de la inducción

Como valores utilizados para el cálculo estimativo de la tensión de inducción, tensión del ruido de inducción, tensión de inducción electrostática, etc. de la línea de comunicación, se adoptan los valores que se detallan a continuación.

(1) Distancia de separación promedio

Al calcular la distancia de separación promedio en el caso que la distancia de separación entre la línea de comunicación y el ferrocarril no fuera fija, se procede de la siguiente manera.

(i) En el caso que la línea de comunicación se cruce con el ferrocarril

(a) En el caso de cruzarse en la forma que se indica en la Fig. 4.1

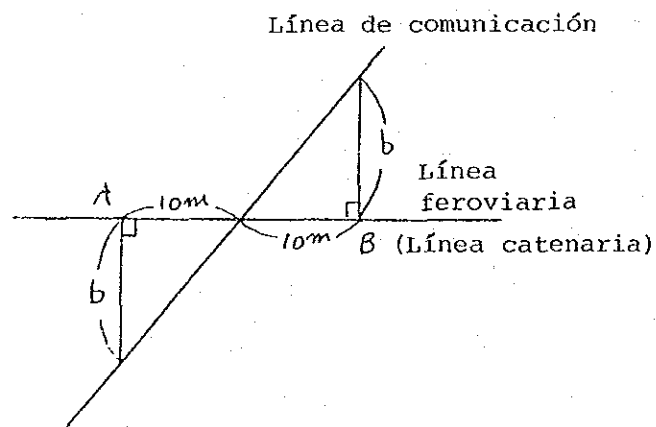


Fig. 4.1 En el caso que la línea de comunicación se cruce con el ferrocarril (1)

Al fijar los puntos A y B en las ubicaciones que se encuentran a 10 m hacia adelante y atrás de la línea ferroviaria desde el punto de intersección y cuando la distancia desde el punto A y la distancia desde el punto B hasta la línea de comunicación fuera b , la distancia de separación promedio b_m queda en $b/2$ y la longitud en paralelo l queda en 20 m.

Sin embargo, en el caso que $b > 100$ m, la longitud en paralelo l de esta parte sería 0 y se desprecia.

- (b) En el caso que se cruce en la forma que se indica en la Fig. 4.2

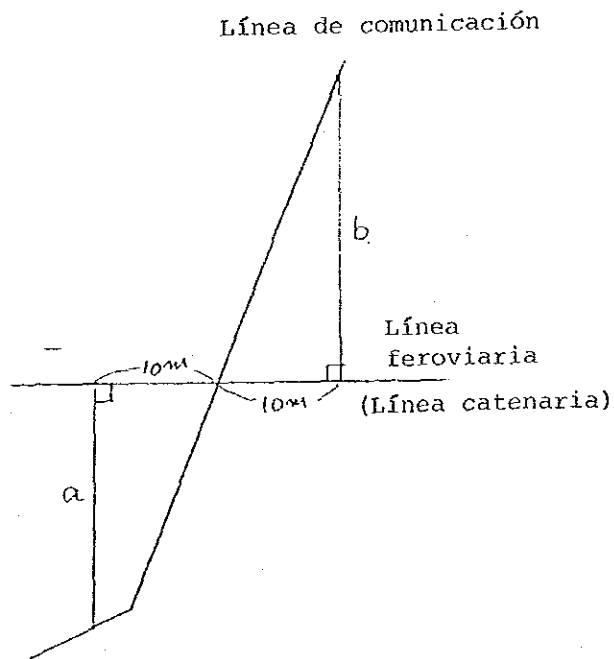


Fig. 4.2 En el caso de que la línea de comunicación se cruce con el ferrocarril (2)

En el caso que se indica en la Fig. 4.2, cuando $a < 100$ m y $b > 100$ m, la distancia de separación promedio b_m sería $a/2$ y

la longitud de exposición paralela ℓ sería 10 m. El ℓ para el b se desprecia.

Asimismo, cuando $a < 100$ m y $b < 100$ m, la distancia de separación promedio b_m de la parte a sería $a/2$ y la longitud de exposición paralela ℓ sería 10 m.

La distancia de separación promedio b_m de la parte b sería $b/2$ y la longitud de exposición paralela ℓ sería 10 m.

- (ii) En el caso de que la línea de comunicación no se cruce con la línea ferroviaria

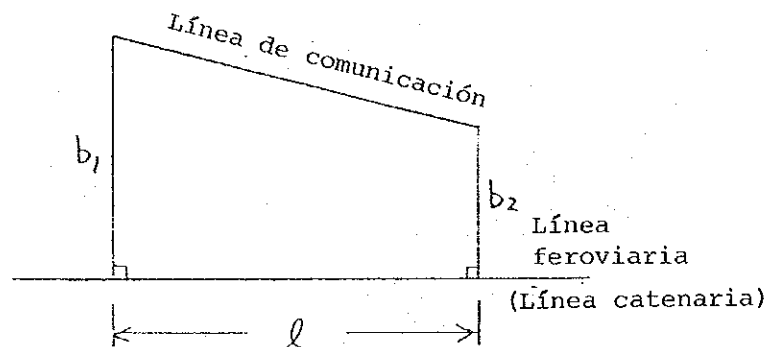


Fig. 4.3 En el caso de que la línea de comunicación no se cruce con el ferrocarril

En el caso como el que se indica en la Fig. 4.3, la longitud de la línea de comunicación proyectada sobre la línea ferroviaria sería ℓ m y la distancia de separación promedio b_m sería

$$\frac{b_1 + b_2}{2}$$

(2) Impedancia mutua M

La impedancia mutua entre la línea catenaria y la línea de comunicación se calcula utilizando la fórmula de Carson-Pollaczek y para el cálculo de la tensión de inducción, tensión de inducción peligrosa para avería, etc., se utiliza la Fig. 4.4 de la inductancia mutua M_{60} de 60 Hz.

Asimismo, para el cálculo de la tensión del ruido de inducción, se utiliza la Fig. 4.5 de la inductancia mutua M_{800} a 800 Hz.

La inductancia mutua M_{12} entre dos conductos se calcula con la fórmula de Carson-Pollaczek como sigue.

$$M_{12} = 2 \log_e \frac{2}{k \sqrt{b^2 + (h_1 - h_2)^2}} + \frac{4}{3\sqrt{2}} k (h_1 + h_2) \\ - 0,1544 - j \left\{ \frac{\pi}{2} - \frac{4}{3\sqrt{2}} k (h_1 + h_2) \right\} \times 10^{-4} \text{ H/km}$$

En este caso,

$$k \sqrt{b^2 + (h_1 - h_2)^2} < 0,5$$

$$k = 2\pi \sqrt{2\sigma f} \times 10^{-7}$$

σ : Conductividad de la tierra (s/m)

f : Frecuencia (Hz)

b : Distancia de separación entre dos conductores (m)

h_1, h_2 : Altura de los dos conductores (m)

$$M_{12} = \frac{4}{kb} [kei'(kb) - j\left(\frac{1}{kb} + ker'(kb)\right)] \times 10^{-4} \text{ H/km}$$

En este caso, $kb \geq 0,5$ $(h_1 + h_2) \ll b$

$kei'(kb)$, $ker'(kb)$: Funciones de Kelvin

$$M_{12} = -j \frac{1}{(kb)^2} \times 10^{-4} \text{ H/km}$$

En este caso, $kb > 10$

En cuanto a la inductancia propia L cuando el radio del conductor fuera r y la altura fuera h , se calcula con la siguiente fórmula de cálculo.

$$L = 2 \log_e \frac{2}{kr} + \frac{8}{3\sqrt{2}} kh - 0,1544 - j\left(\frac{\pi}{2} - \frac{8}{3\sqrt{2}} kh\right) \\ \times 10^{-4} \text{ H/km}$$

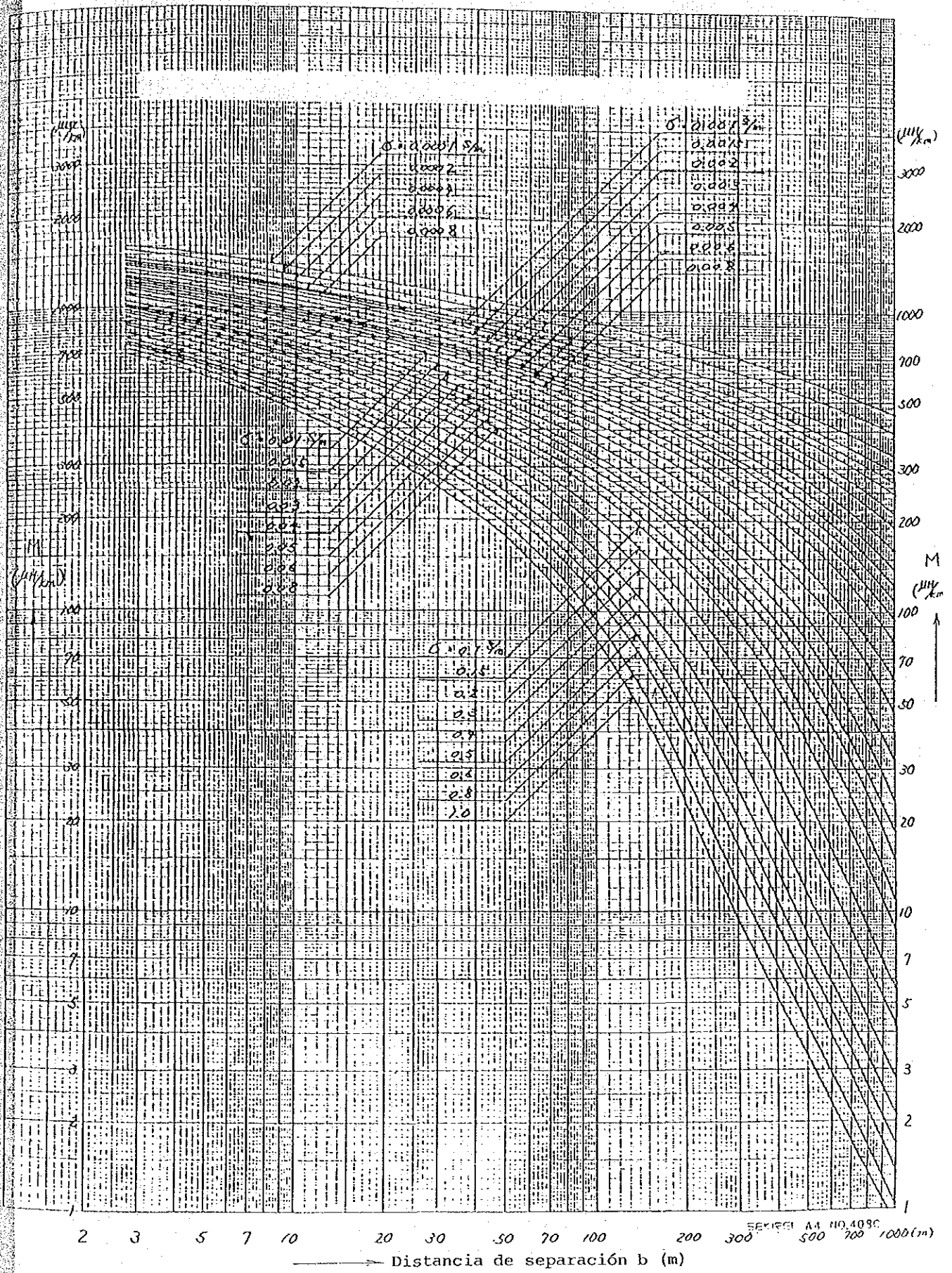


Fig. 4.4 Inductancia mutua M_{60} a 60 Hz $\mu\text{H}/\text{km}$

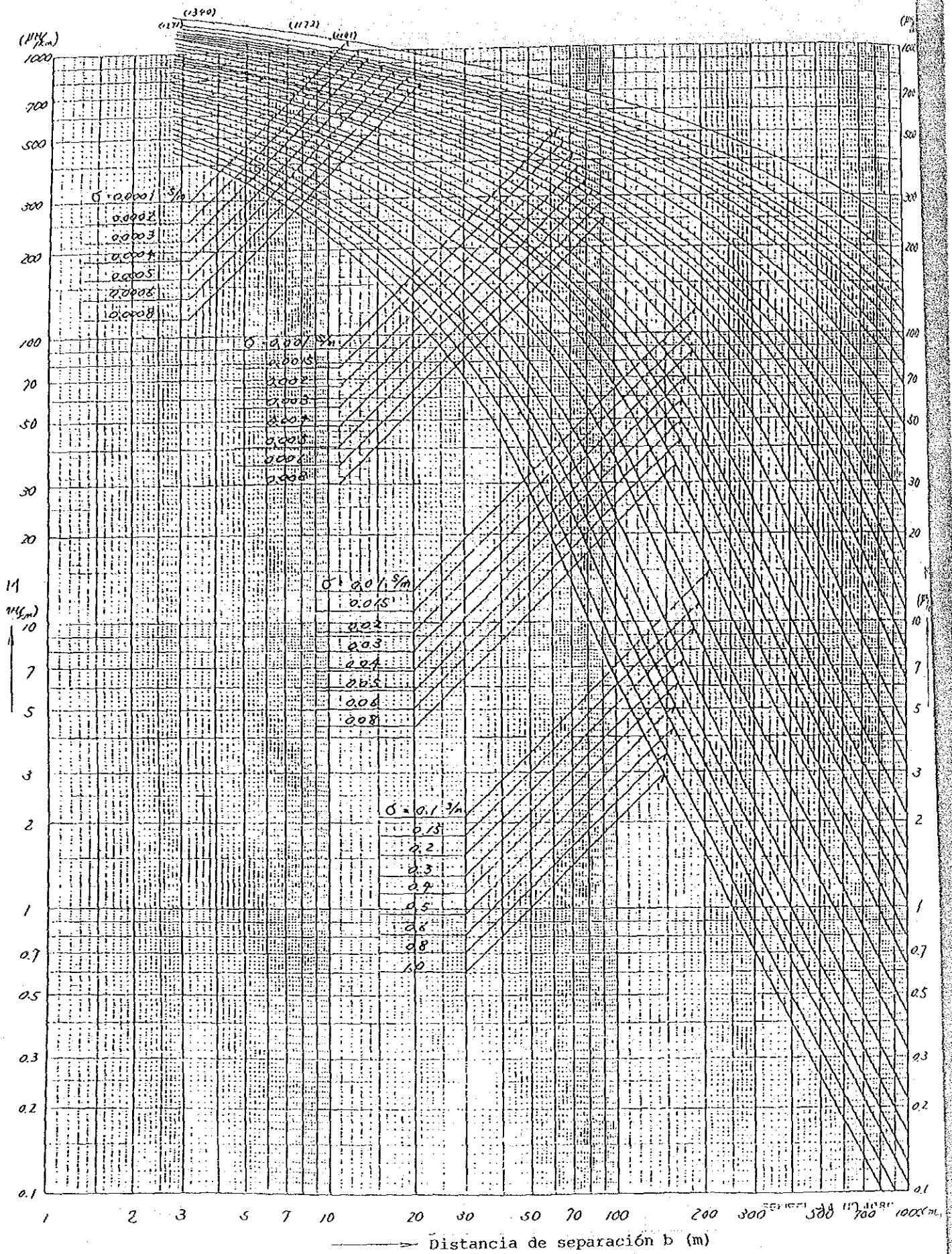


Fig. 4.5 Inductancia mutua M_{800} a 800 Hz $\mu\text{H}/\text{km}$

(3) Corriente de carga I_p y corriente perturbadora equivalente J_p

- (i) La corriente de carga I_p se obtiene de la curva de operación de la carga del vehículo ferroviario, etc.

Para el tramo México - Querétaro, la corriente de carga I_p para la composición del tren con una unidad de locomotora será (200 A), y cuando se opere con dos locomotoras en tándem, el I_p será (400 A).

- (ii) La corriente perturbadora equivalente J_p se obtiene del valor de medición práctica durante la operación de los vehículos ferroviarios o por el valor de diseño del vehículo ferroviario.

Para el tramo México - Querétaro, la corriente perturbadora equivalente J_p para la composición del tren con una unidad de locomotora será (14 A), y cuando se opere con dos locomotoras en tándem, el J_p será (19,5 A).

El valor J_p que se utilice para calcular la tensión del ruido de inducción, se utiliza el mismo valor de J_p para el cable de comunicación con capa de blindaje, mientras que para el cable de comunicación desnudo o sin capa de blindaje, se utiliza el valor J_p de 0,73 veces.

Además, los valores J_p de la locomotora que no fuera del tipo de control con tiristores, serían los siguientes cuando la corriente de carga del vehículo ferroviario fuera $I_p = 100$ A y la frecuencia de la energía del sistema fuera de 60 Hz.

Cuando el factor de armónicas de orden superior

$$\text{fuera } 1/n^2: J_p = 2,3 \text{ A}$$

Cuando el factor de armónicas de orden superior

$$\text{fuera } 1,5/n^2: J_p = 3,45 \text{ A}$$

(4) Corriente para avería I_f

Para la corriente para avería se utiliza el valor calculado con la fórmula (3.7) para cada tramo de alimentación.

La impedancia del circuito de alimentación se obtiene por el Cuadro 4.1.

Cuadro 4.1 Impedancia del circuito de alimentación

($f = 60 \text{ Hz}$)

Por clase de circuito de alimentación	Impedancia del circuito de alimentación Z (Ω/km)	Nota
Vía simple	$0,453 \angle 77,79^\circ$	Se abrevian los efectos del potencial del riel
Vía doble	$0,410 \angle 78,24^\circ$	Se abrevian los efectos del potencial del riel

Se describe un ejemplo de la corriente para avería en la Fig. 4.6.

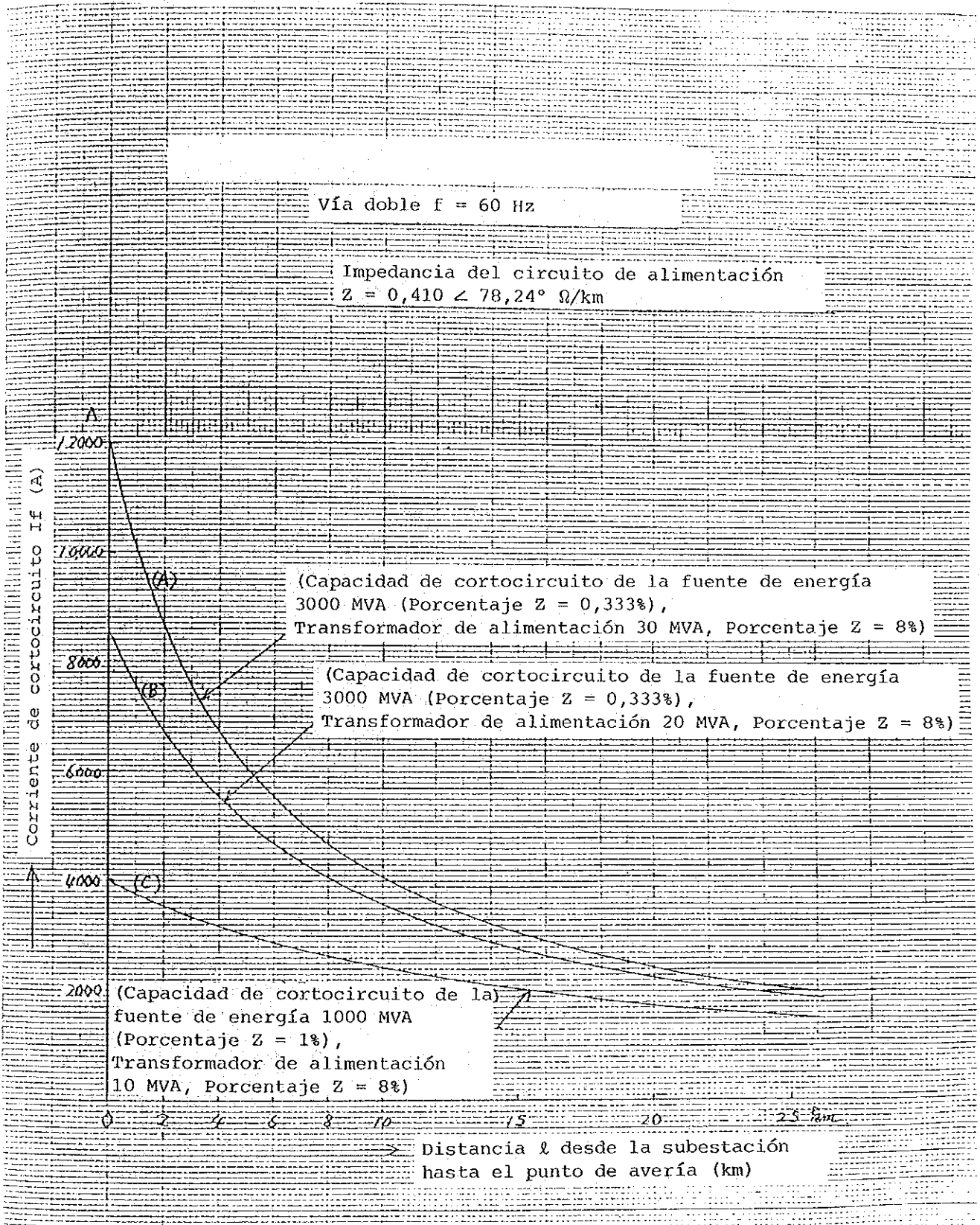


Fig. 4.6 Corriente de cortocircuito del circuito de alimentación I_f

- (5) Coeficiente de blindaje por el riel y el alambre de tierra (1-n)

En el caso de vía simple, se utilizan los Cuadros 4.2 y 4.3 y la Fig. 4.7, y en el caso de vía doble se utilizan los Cuadros 4.4 y 4.5 y la Fig. 4.8.

Cuadro 4.2 1-n de vía simple

(f = 60 Hz)

Conductividad de la tierra σ (s/m)	α_1	β_1	n_1	m_1	n	1-n
0,0001	0,626	0,375	0,633	0	0,633	0,371
0,001	0,625	0,376	0,591	0	0,591	0,413
0,01	0,624	0,377	0,539	0	0,539	0,464
0,1	0,624	0,378	0,474	0	0,474	0,528
1,0	0,623	0,378	0,393	0	0,393	0,607

Cuadro 4.3 1-n de vía simple

(f = 800 Hz)

Conductividad de la tierra σ (s/m)	α_1	β_1	n_1	m_1	n	1-n
0,0001	0,633	0,367	0,661	0	0,661	0,340
0,001	0,632	0,368	0,612	0	0,612	0,390
0,01	0,631	0,369	0,549	0	0,549	0,454
0,1	0,631	0,370	0,468	0	0,467	0,537
1,0	0,630	0,370	0,369	0	0,369	0,637

$$\alpha_1 = I_T/I, \quad \beta_1 = I_F/I,$$

$$I = I_T + I_F$$

Corriente de carga del
vehículo ferroviario
(60 Hz)

$$n_1 = I_R/I, \quad m_1 = I_G/I = 0$$

$$1-n = \alpha_1 + \beta_1 - n_1 - m_1$$

En el caso de $f = 800$ Hz, se utiliza para el cálculo de la tensión del ruido de inducción en el Cuadro 4.3.

Cuadro 4.4 1-n de vía doble

(f = 60 Hz)

σ (s/m)	α	β	n_1	n_2	m_1	m_2	n	1-n
0,0001	0,628	0,373	0,398	0,350	0	0	0,747	0,255
0,001	0,627	0,374	0,380	0,332	0	0	0,712	0,290
0,01	0,627	0,375	0,357	0,309	0	0	0,656	0,335
0,1	0,626	0,375	0,326	0,279	0	0	0,605	0,395
1,0	0,625	0,376	0,286	0,239	0	0	0,524	0,476

Cuadro 4.5 1-n de vía doble

(f = 800 Hz)

σ (s/m)	α	β	n_1	n_2	m_1	m_2	n	1-n
0,0001	0,635	0,365	0,416	0,344	0	0	0,760	0,241
0,001	0,634	0,366	0,396	0,323	0	0	0,719	0,283
0,01	0,634	0,367	0,368	0,295	0	0	0,663	0,340
0,1	0,633	0,367	0,330	0,258	0	0	0,587	0,418
1,0	0,632	0,368	0,280	0,210	0	0	0,490	0,517

$$\alpha = I_{T1}/I, \quad \beta = I_{F1}/I$$

$$I = I_{T1} + I_{F1}$$

Corriente de carga del
vehículo ferroviario
(60 Hz)

$$n_1 = I_{R1}/I, \quad n_2 = I_{R2}/I$$

$$m_1 = I_{G1}/I = 0, \quad m_2 = I_{G2}/I = 0$$

$$1-n = \alpha + \beta - n_1 - n_2 - m_1 - m_2$$

En el caso de f = 800 Hz, se utiliza para el cálculo de la tensión del ruido de inducción en el Cuadro 4.5.

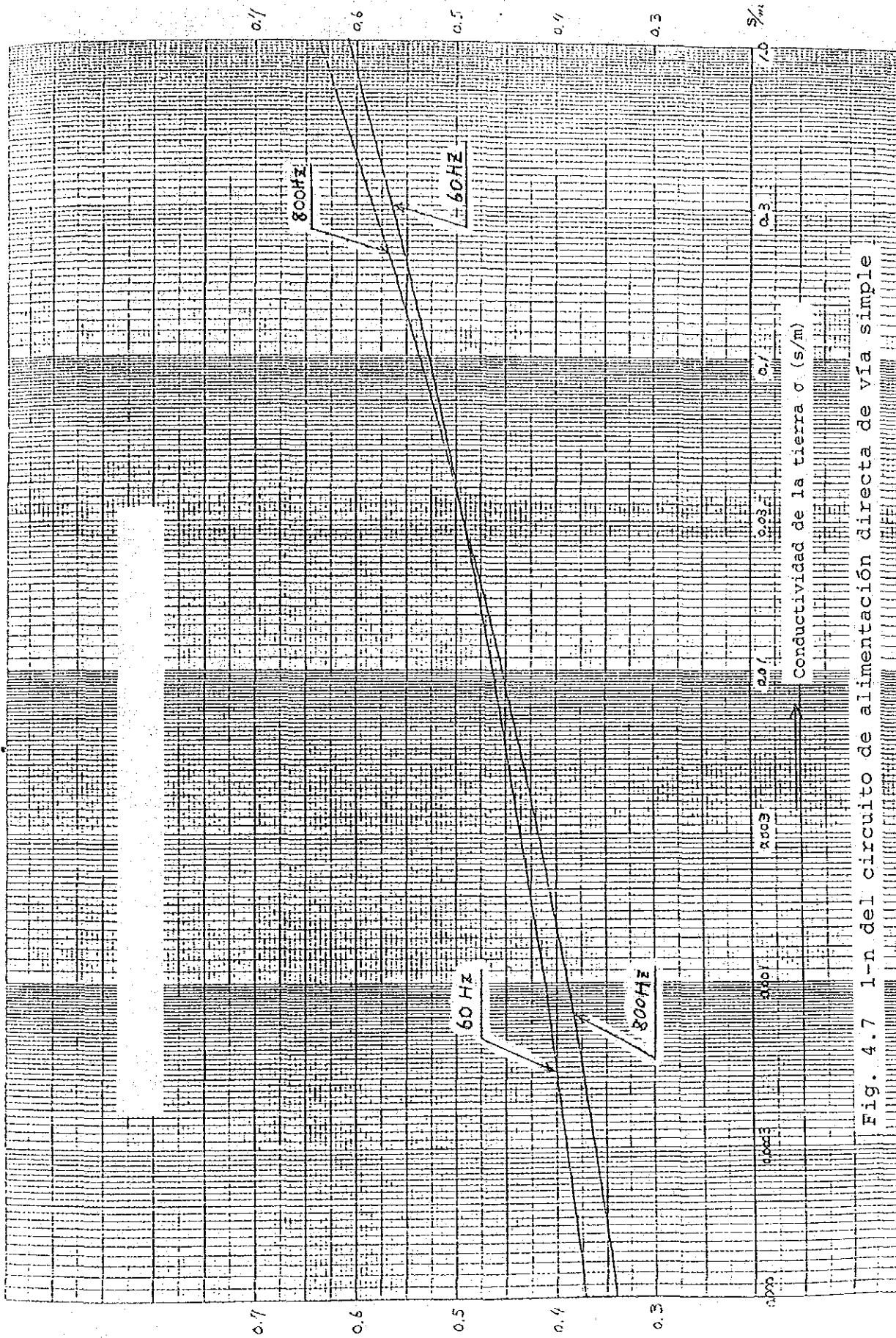


Fig. 4.7 1-n del circuito de alimentación directa de vía simple

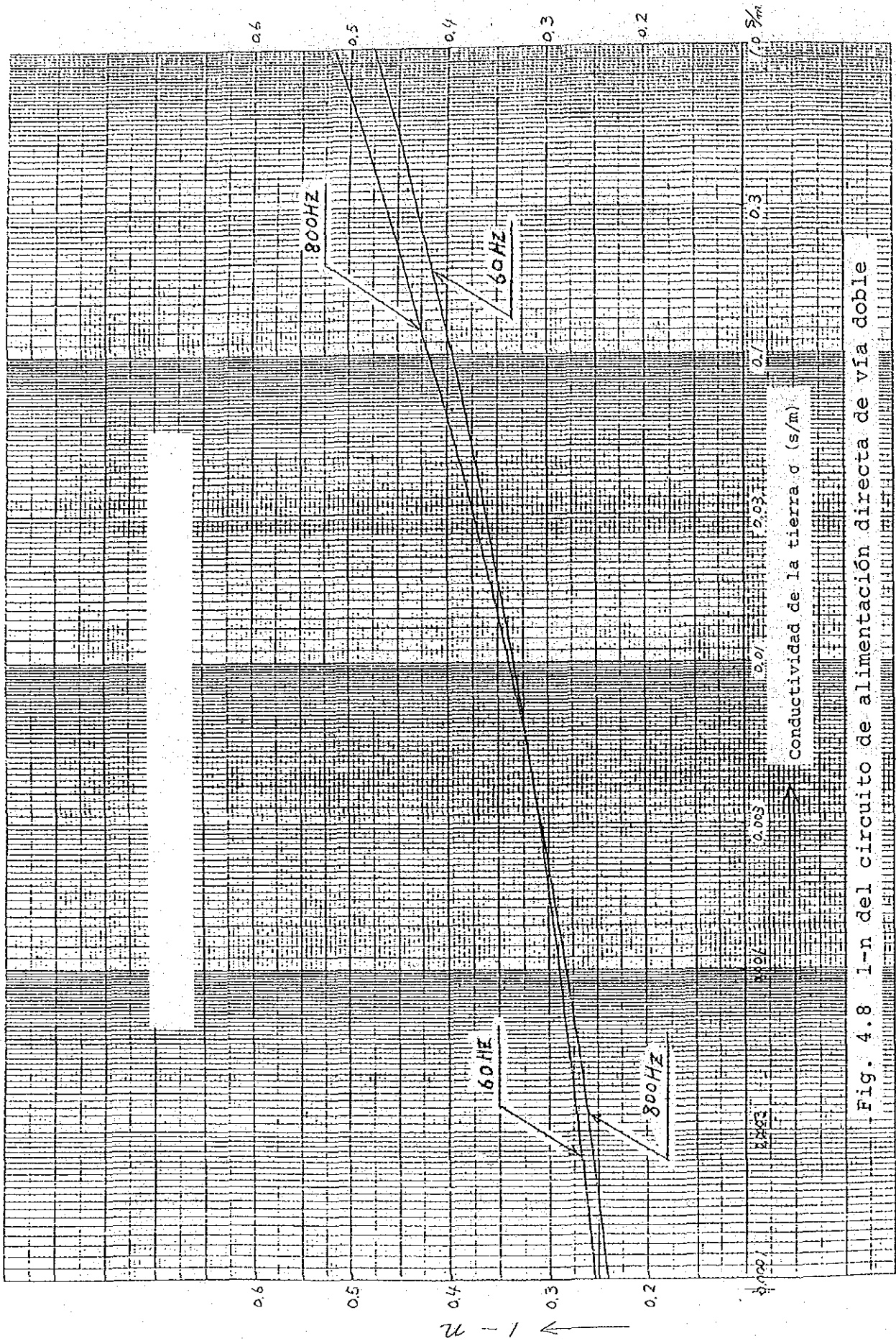


Fig. 4.8 1-n del circuito de alimentación directa de vía doble

- (6) Tensión de inducción V_m y tensión del ruido de inducción V_n en el caso de que la distancia de separación de la línea de comunicación fuera pequeña

En el caso de vía simple las tensiones de inducción $V_m/A \cdot km$ se indican en las Fig. 4.9 y 4.10 y las tensiones del ruido de inducción $V_n/A \cdot km$ se indican en las Fig. 4.11 y 4.12.

Asimismo, en el caso de vía doble las tensiones de inducción $V_m/A \cdot km$ se indican en las Fig. 4.13 y 4.14 y las tensiones del ruido de inducción $V_n/A \cdot km$ se indican en las Fig. 4.15 y 4.16.

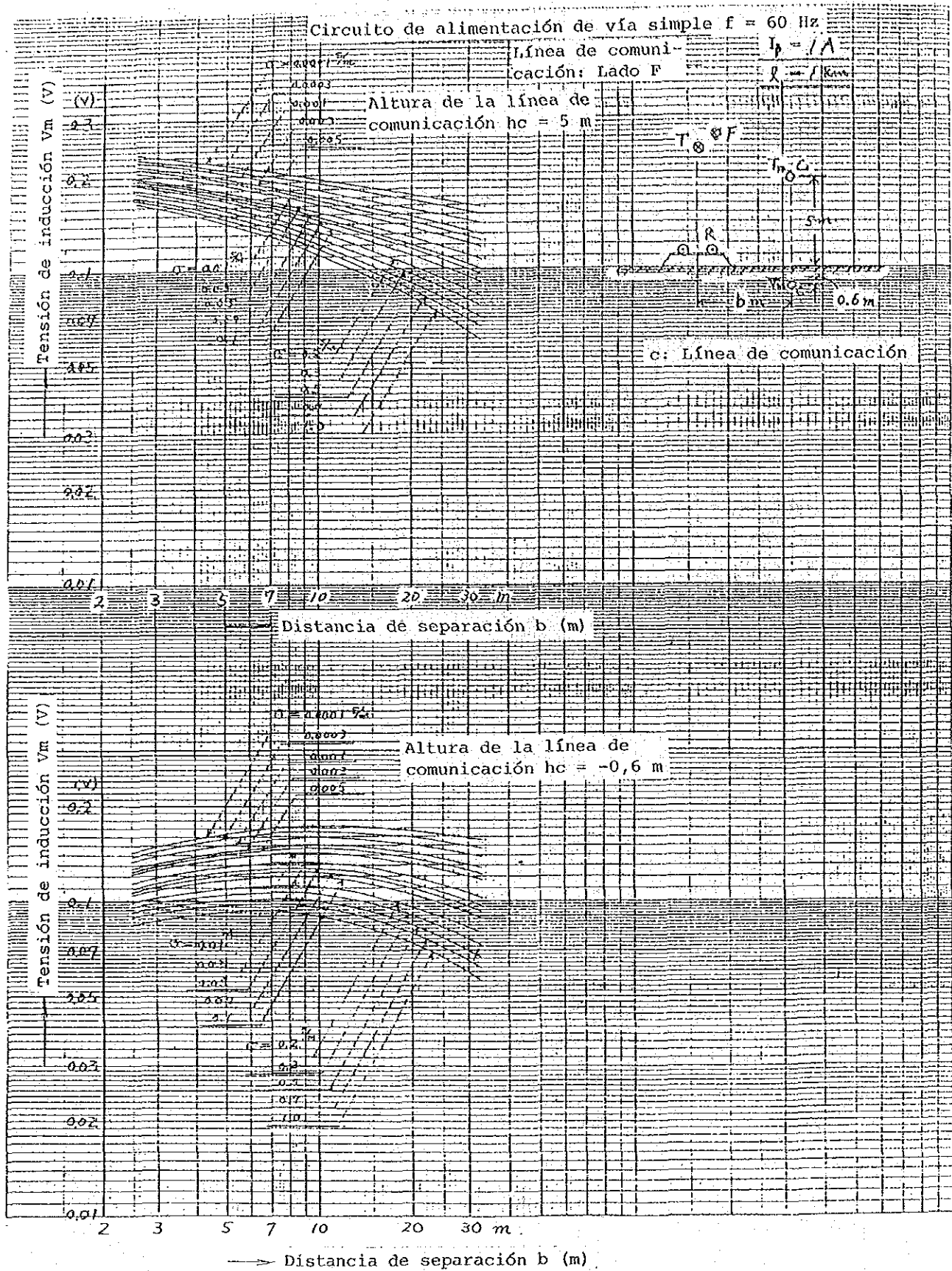


Fig. 4.9 Tensión de inducción de la línea de comunicación (En el caso de que la distancia de separación fuera pequeña) $V_m/A \cdot \text{km}$

Circuito de alimentación de vía simple $f = 60 \text{ Hz}$

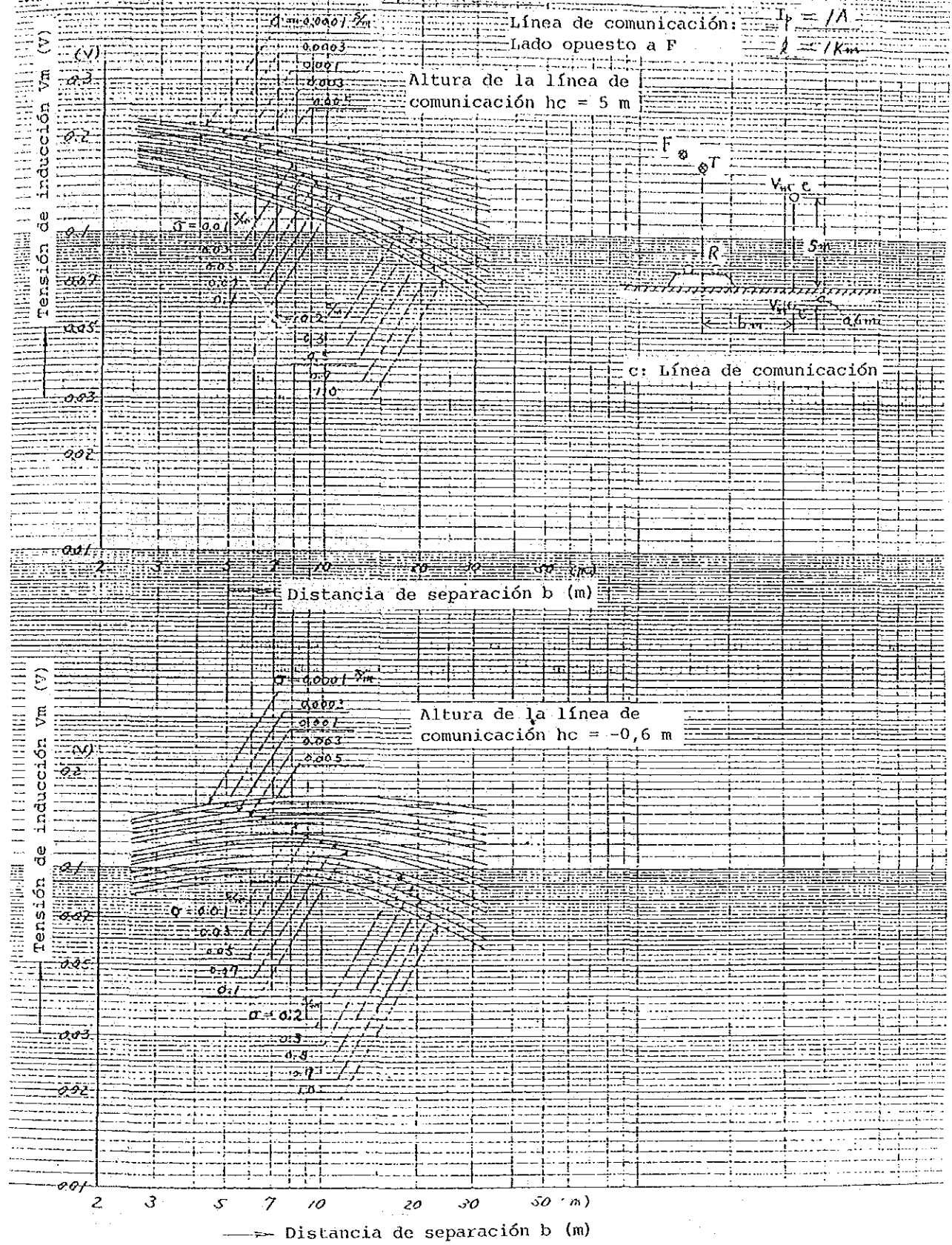


Fig. 4.10 Tensión de inducción de la línea de comunicación (En el caso de que la distancia de separación fuera pequeña) $V_m/A \cdot \text{km}$

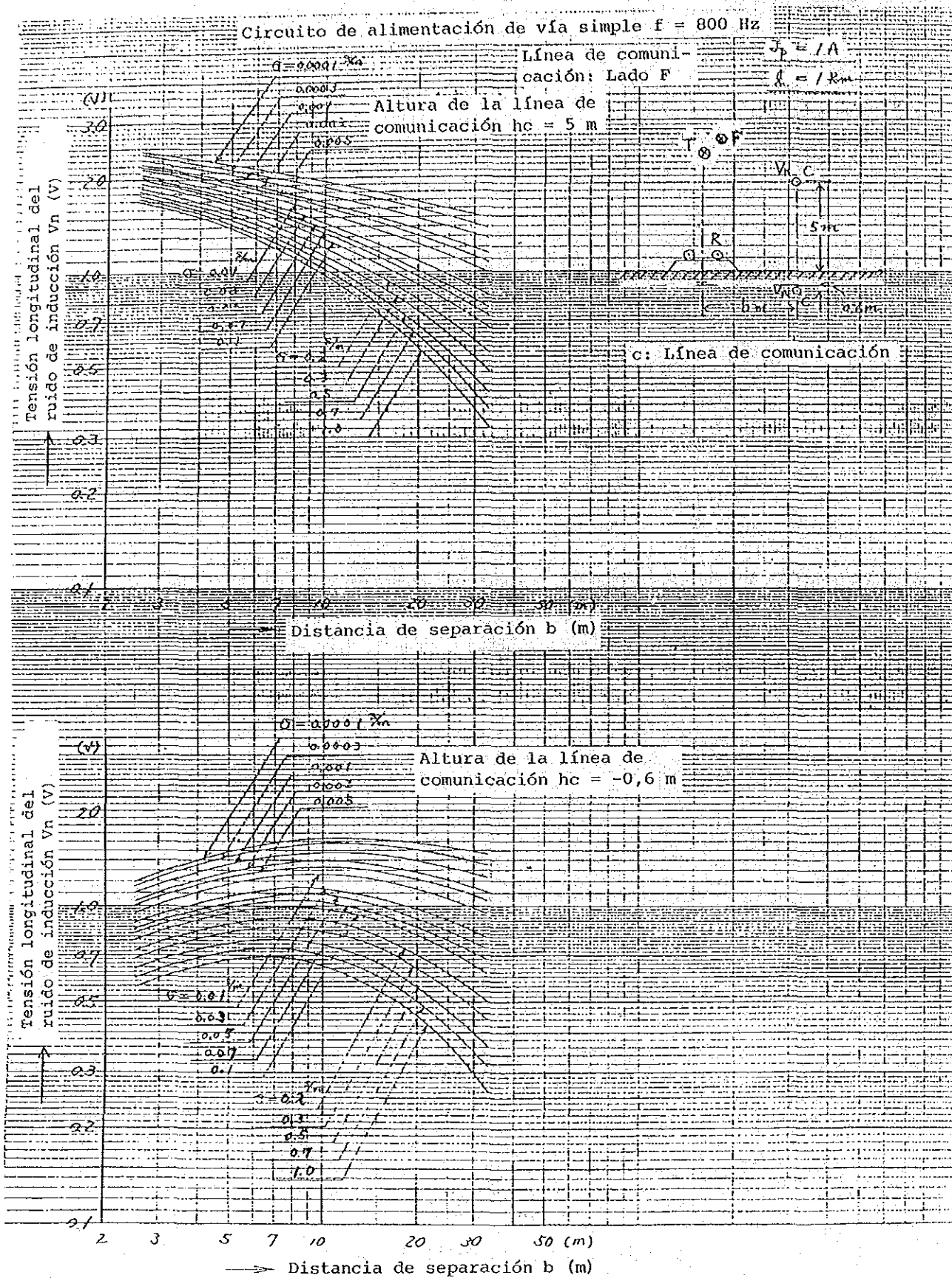


Fig. 4.11 Tensión longitudinal del ruido de inducción de la línea de comunicación (En el caso de que la distancia de separación fuera pequeña) $V_n/A \cdot \text{km}$

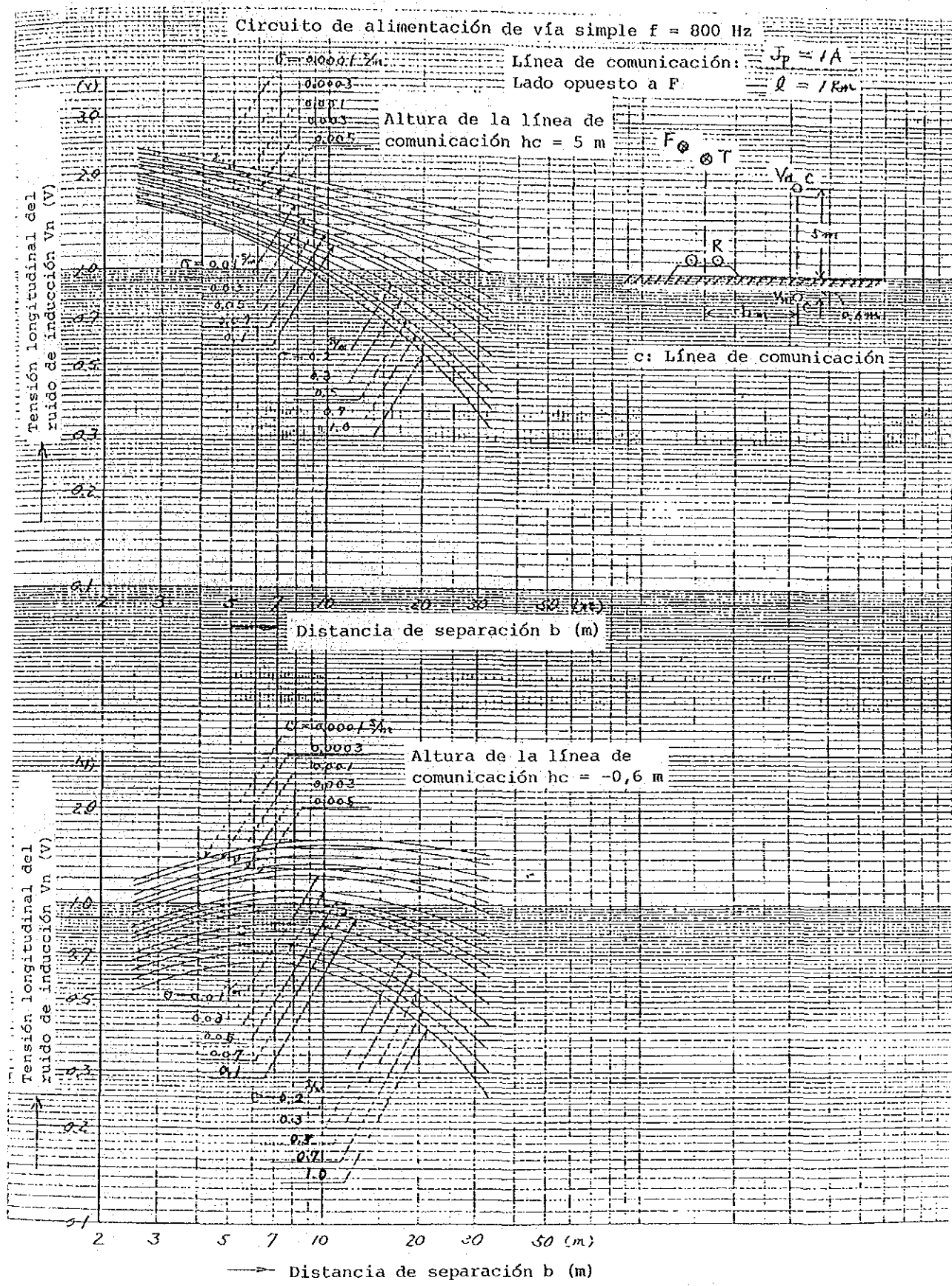


Fig. 4.12 Tensión longitudinal del ruido de inducción de la línea de comunicación (En el caso de que la distancia de separación fuera pequeña) $V_n/A \cdot km$

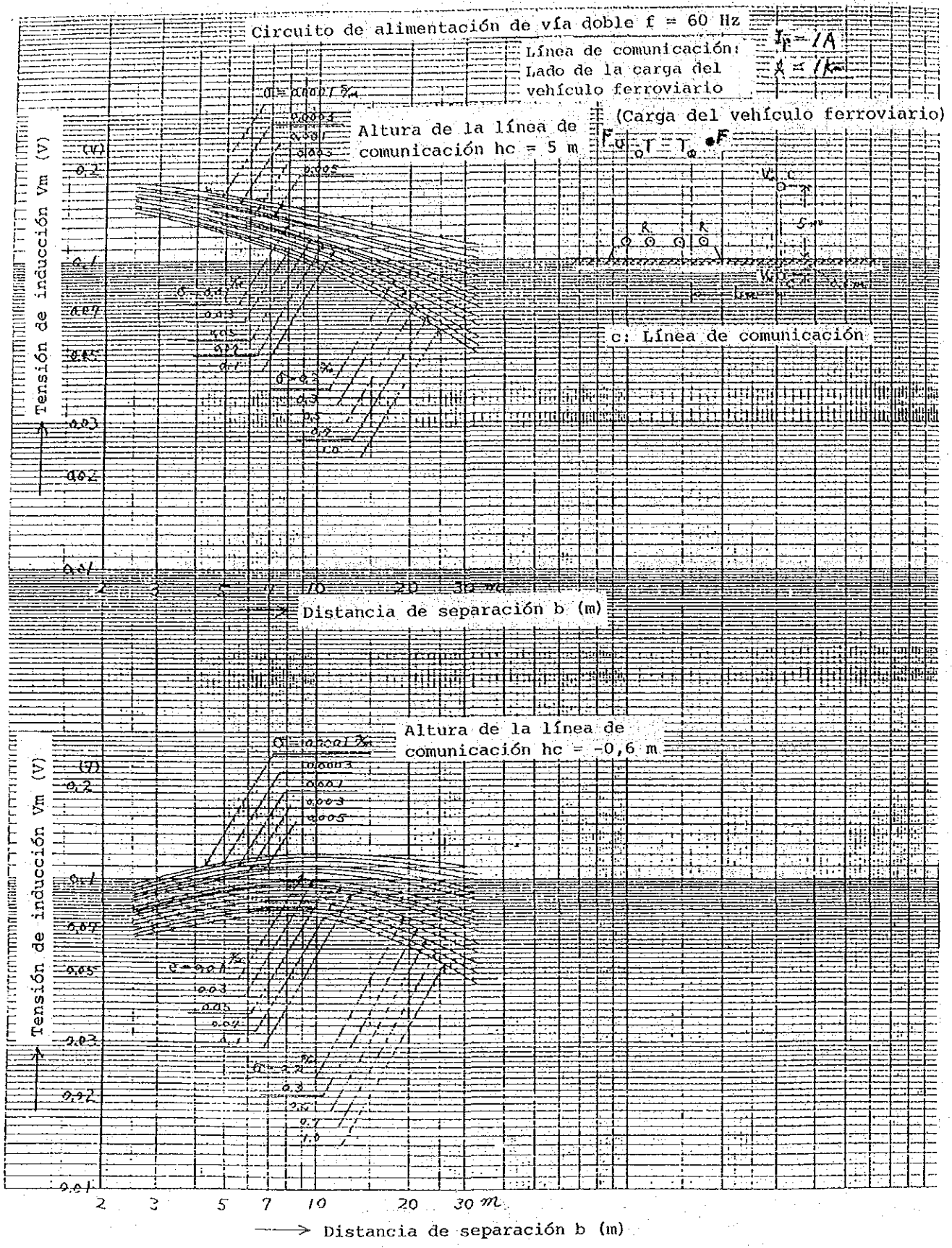


Fig. 4.13 Tensión de inducción de la línea de comunicación (En el caso de que la distancia de separación fuera pequeña) $V_m/A \cdot \text{km}$

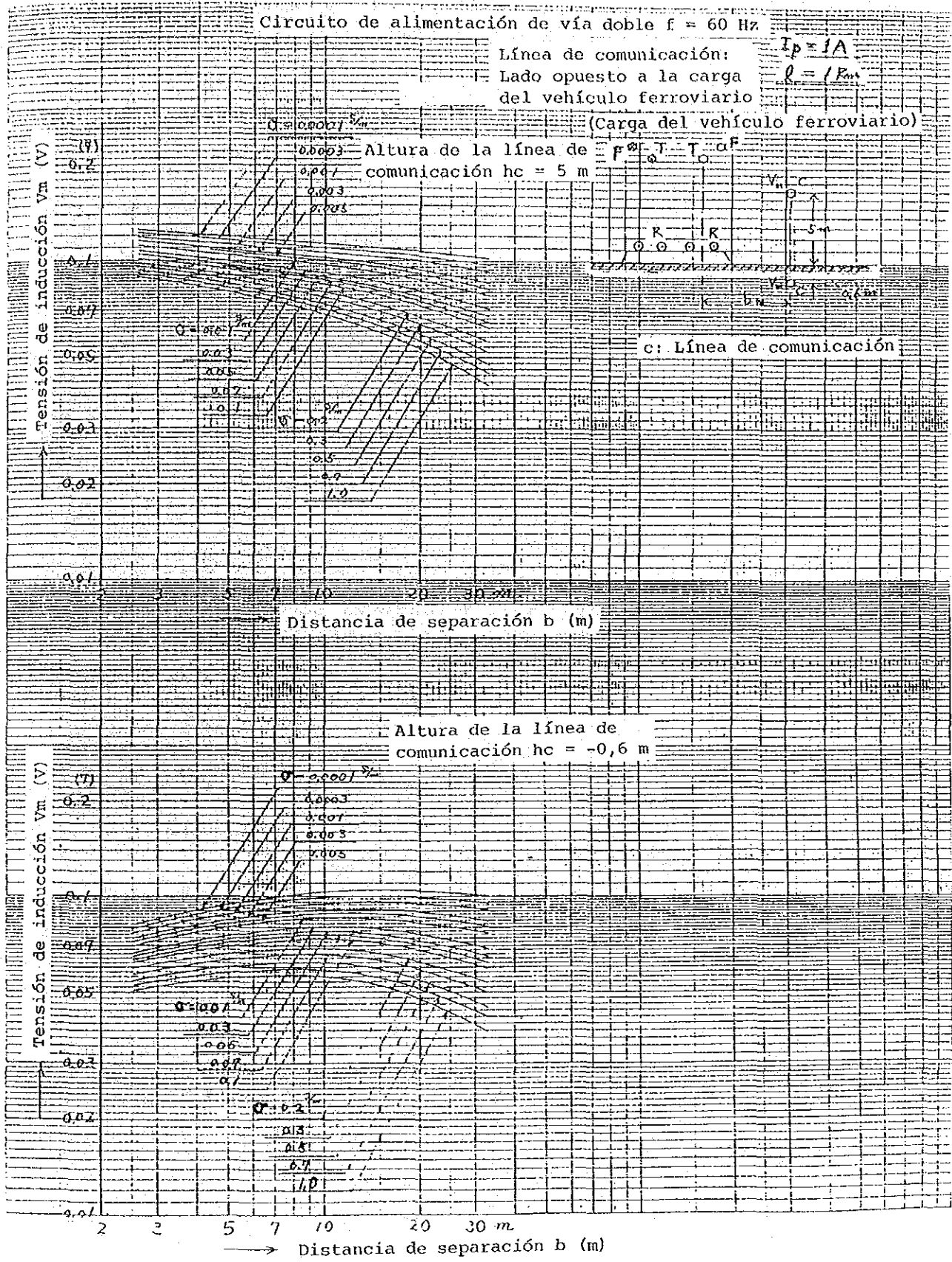


Fig. 4.14 Tensión de inducción de la línea de comunicación (En el caso de que la distancia de separación fuera pequeña) $V_m/A \cdot \text{km}$

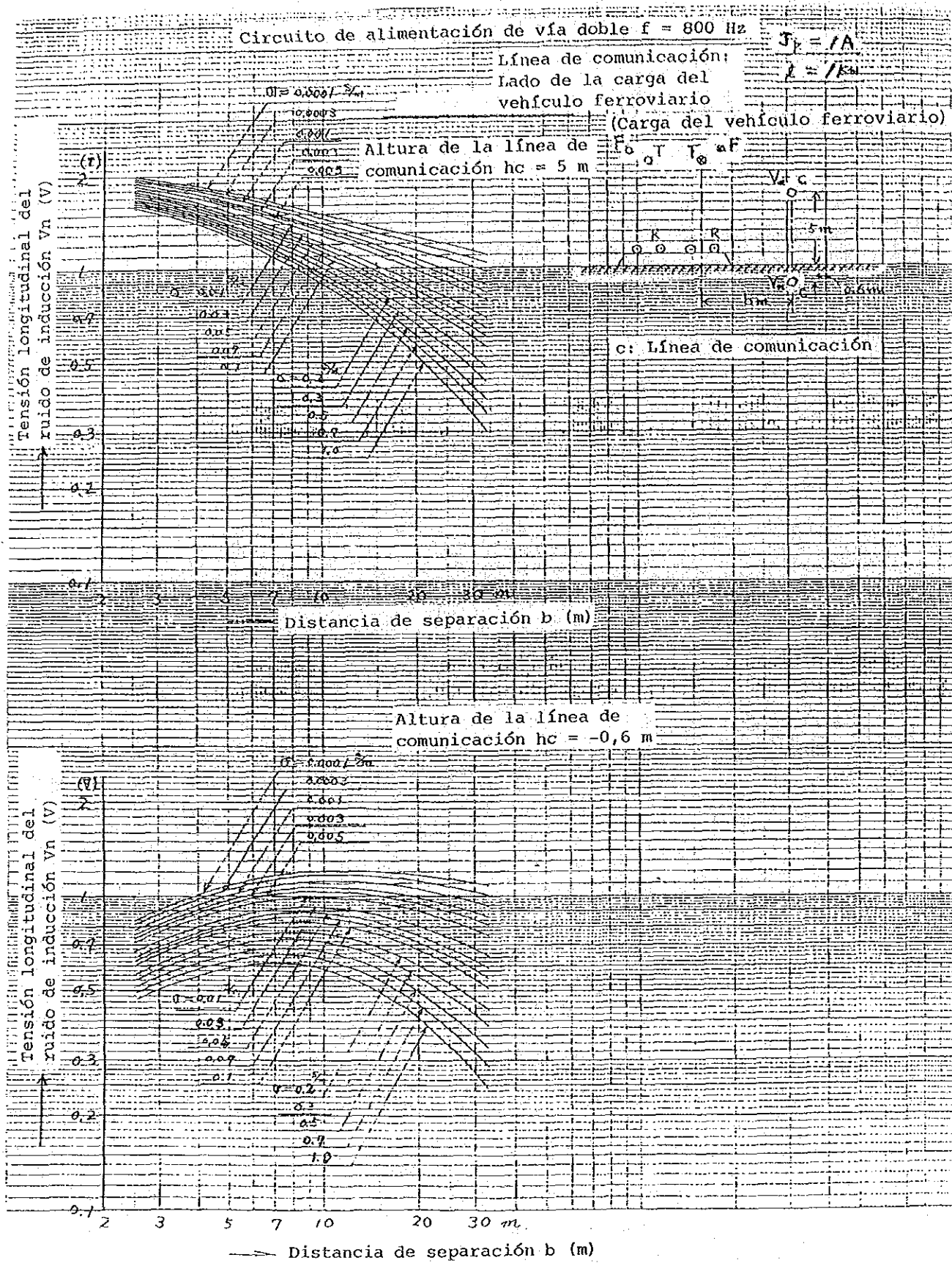


Fig. 4.15 Tensión longitudinal del ruido de inducción de la línea de comunicación (En el caso de que la distancia de separación fuera pequeña) $V_n/A \cdot km$

Circuito de alimentación de vía doble $f = 800 \text{ Hz}$

Línea de comunicación: $I_p = 1 \text{ A}$

Lado opuesto a la carga $\rho = 1/\text{km}$

del vehículo ferroviario (Carga del vehículo ferroviario)

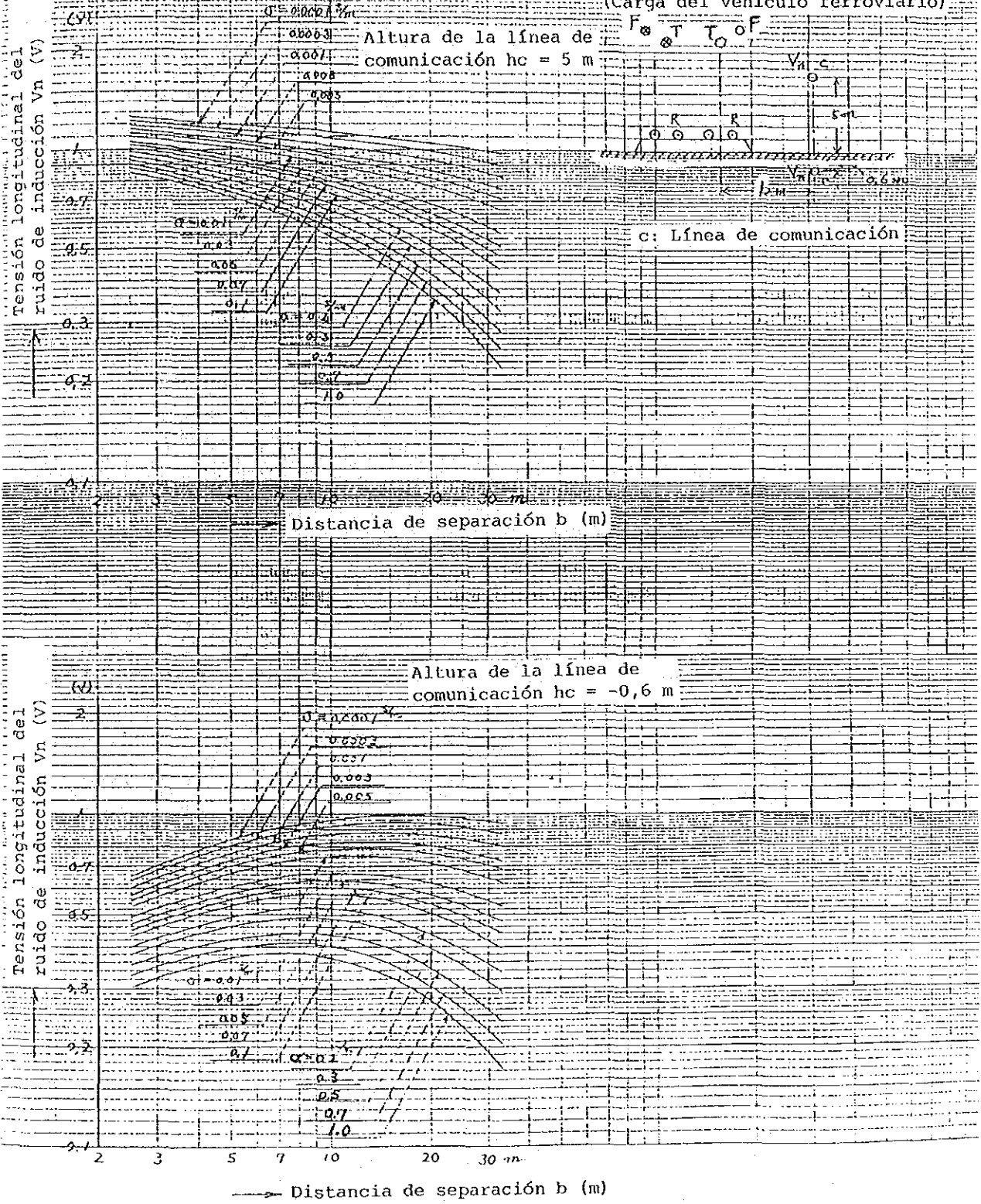


Fig. 4.16 Tensión longitudinal del ruido de inducción de la línea de comunicación (En el caso de que la distancia de separación fuera pequeña) $V_n/A \cdot \text{km}$