



**Contenido:**

- ❖ **Interferencia Electromagnética en los Sistemas de Telefonía.**

## Soporte Científico-Técnico

Boletín No. 11  
Año 2002 by AWD

### Interferencia Electromagnética generada por el Tren de Alta Velocidad en los Sistemas de Telefonía

J E. Vila , P.G. Vicente de Vera, J. Castro  
TELFÓNICA I+D

W. Warzanskyj  
TELFÓNICA, DPTO. TECNOLOGÍA Y NORMATIVA TÉCNICA

Las líneas de telecomunicación situadas en las proximidades de líneas de potencia se ven afectados por perturbaciones de origen electromagnéticos. El presente artículo expone los diferentes tipos de perturbaciones debidas a la línea de tracción eléctrica del Tren de Alta Velocidad y sus métodos de cálculo. Finalmente se aplican a un caso practico y se evalúa la influencia de algunos de los parámetros involucrados.

#### INTRODUCCIÓN

La instalación del Tren de Alta Velocidad (TAV) presenta una problemática de Compatibilidad Electromagnética (EMC) con su entorno, debido a que su red de tracción eléctrica interfiere con las líneas de telecomunicación próximas.

El problema se plantea en términos de coexistencia entre dos sistemas que deben compartir un cierto espacio físico. Por una parte el elemento perturbador, la línea de tracción eléctrica, y por otra el elemento perturbado, la línea de telecomunicación.

La alimentación del TAV se va a realizar a una tensión de 25 Kvolts, 50 Hz. y su consumo es del orden de 720 Amp. (la corriente máxima por la catenaria es de 1250 Amp.).

Así mismo, deben cumplirse un conjunto de Recomendaciones del CCITT [5], que se refieren a la protección de las personas y al máximo nivel de ruido sofométrico admitido.

Todo lo anterior fue determinado en el Dpto. de Tecnología y Normativa Técnica de Telefónica, y ha dado origen a un proyecto que se ha insertado dentro del conjunto de actividades que en EMC se desarrollan en Telefónica I+D. Los objetivos del proyecto en curso, son los siguientes:

Desarrollar un CAD de EMC que pueda ser integrado en el sistema gráfico que Telefónica está usando para la digitalización de su Planta y que sirva de soporte para el diseño de nuevas redes.

**Serie de Colección**

Copyright © 2000

Investigar la influencia de los diferentes parámetros involucrados y contrastarla con los resultados de un plan de medidas.

El presente artículo describe los diferentes efectos perturbadores, su análisis, la influencia de alguno de sus parámetros y un ejemplo de aplicación a un tramo de la línea del TAV Madrid-Sevilla.

## **LÍNEA PERTURBADORA**

La línea de tracción eléctrica del TAV es el elemento perturbador. La solución de los problemas de interferencia se adopta actuando, por una parte sobre el elemento perturbador, con objeto de reducir en lo posible la generación de interferencias, y por otra parte sobre el elemento perturbado, la línea de telecomunicación, de forma que sea más resistente o menos afectado en su funcionamiento por las perturbaciones.

Vamos a describir brevemente los posibles sistemas de alimentación, realizando hincapié en los elementos que contribuyen a minimizar la interferencia y en su efecto reductor. Posteriormente se hacen algunas consideraciones acerca de los armónicos generados en la máquina.

Los sistemas para reducir el nivel de perturbaciones tienen como objetivo el proporcionar a la corriente de retorno un camino definido y próximo al de la corriente de la catenaria. De esta forma, al sumarse los efectos inductores de ambas corrientes y tener estas sentidos opuestos, se restan, minimizando el efecto final.

El hecho de añadir los elementos reductores de la interferencia tiene una importante incidencia económica en el coste final de la línea de tracción

Existen, en líneas generales [5], cuatro posibles esquemas de la línea de tracción eléctrica, que se describen a continuación. El primero es el sistema básico, y los tres siguientes incluyen alguna medida para la reducción de la interferencia.

### **Sistema básico**

La figura 1a muestra un esquema del sistema básico de alimentación. Incluye únicamente la catenaria que proporciona la corriente

necesaria a la máquina del tren, siendo el camino de retorno de la corriente por los raíles y tierra. La diferencia entre la corriente por la catenaria y la de los raíles (componente de corriente que retorna por tierra) es la que contribuye principalmente a la generación de perturbaciones. Este sistema de alimentación tan simple no incluye ninguna medida reductora de interferencias.

### **Conductor de retorno**

La figura 1b muestra el esquema de este sistema de alimentación de la máquina del tren.

Se añade un conductor de retorno conectado a los raíles a intervalos regulares, proporciona un camino de baja impedancia a la corriente de retorno.

La corriente por el conductor de retorno circula en sentido contrario a la de la catenaria, por tanto contribuye a reducir la interferencia. En la medida en que su impedancia sea lo suficientemente reducida como para canalizar la máxima cantidad de corriente de retorno, será mayor su eficacia reductora de interferencia.

El hilo de retorno se sitúa próximo al de la catenaria para reducir el tamaño del bucle que forman ambos hilos.

### **Transformadores con conductor de retorno**

La figura 1c muestra el esquema general de la línea de tracción.

Este sistema incluye un hilo de retorno de corriente, conectado a los rieles en una posición intermedia entre los transformadores. Esta conexión proporciona el camino para que la corriente que retorna por los raíles pase a circular por el hilo de retorno.

El transformador obliga a que la corriente circule por el conductor de retorno, ya que la corriente de alimentación que va por la catenaria induce una corriente de sentido contrario en el secundaria del transformador, que a su vez está conectado a los raíles.

En este sistema se produce un cortocircuito al puentear el pantógrafo de la máquina la discontinuidad de la catenaria.

El hilo de retorno debe situarse lo más próximo posible de la catenaria, para que se reduzca el efecto inductor.



Fig 1a

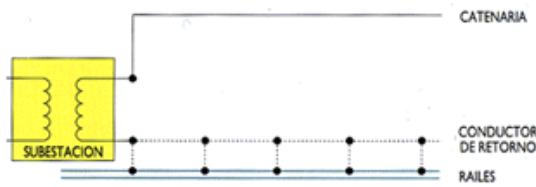


Fig 1.b

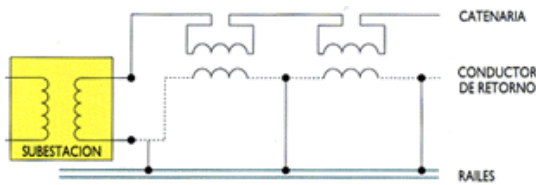


Fig 1c

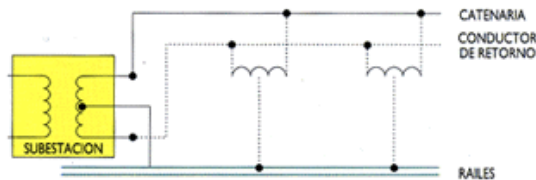


Fig 1d

#### Utilización de autotransformadores.

Un esquema del sistema se muestra en la figura 1d.

La línea de tracción eléctrica incluye, además de la catenaria y los rieles, un conductor de alimentación y cada cierta distancia unos autotransformadores, conectados como se indica en la figura 1d.

Los autotransformadores obligan a que la corriente retorne por el conductor de alimentación, por lo que circula en sentido contrario a la de la catenaria. Su efecto es

similar al del sistema descrito en tercer lugar. La catenaria es continua, por tanto no se produce el cortocircuito descrito en el sistema 3.

El conductor de alimentación debe situarse lo más próximo posible de la catenaria, de forma que se minimice el área del bucle formado por ambos hilos.

#### Amónicos

La máquina de tracción incluye un rectificador de la señal alterna, habitualmente mediante tiristores.

Por tanto se genera una señal con un elevado contenido en armónicos, que se transmite a la línea de tracción y se inducen tensiones a dichas frecuencias en los circuitos de telecomunicación próximos. La máquina debe incluir un filtro supresor de interferencias que reduzca la emisión de los armónicos hacia la línea de tracción.

#### EFFECTOS PERTURBADORES

##### a) Potencial de tierra

La circulación de una corriente por tierra, procedente de la inyección de corriente provocada por un cortocircuito entre la catenaria y el suelo, origina al propagarse una elevación del potencial de tierra que puede afectar a las tomas de tierra próximas.

La variación de potencial tiene forma de hipérbola, disminuyendo al alejarse del punto donde se produce la inyección de corriente a tierra. El potencial es función de la distancia entre el lugar donde se ha producido el fallo y la toma de masa, de la corriente inyectada a tierra y de la conductividad del terreno. Tiene un valor máximo que es el del potencial del punto donde se produce la introducción de la corriente hacia tierra.

Además debe añadirse que las masas metálicas próximas, con una conductividad superior a la del terreno, sirven de camino más fácil para la corriente, modificando por tanto la distribución de corrientes por el suelo.

Una aproximación al problema consiste en suponer que la corriente se distribuye de forma homogénea en la tierra, esto conduce a la siguiente expresión:

$$U = \frac{\rho}{2 \pi x} I_d$$

siendo,

U = Potencial en voltios.

$\rho$  = Resistividad del suelo en ohmios por metro

x = distancia en metros

$I_d$  = Corriente en el punto del fallo en amperios

### **b) Efecto eléctrico**

La presencia de un conductor a un potencial elevado provoca la aparición de una cierta distribución de cargas en los conductores próximos. Este efecto se traduce en el posible paso de una corriente a través de una persona que este en contacto con un conductor de la línea de telecomunicación y tierra. La corriente máxima autorizada es de 10 mA.

Se calcula a partir de los datos geométricos, que nos permiten evaluar las capacidades entre los diferentes hilos y las de cada uno de ellos a tierra.

Este efecto es importante únicamente en el caso de paralelismo muy largo (varios km) y distancias muy cortas entre las líneas de tracción y comunicaciones.

### **c) Efecto magnético**

El bucle formado por un conductor de telecomunicación, sus admitancias terminales y el plano efectivo de masa está sometido a la acción de un campo variable procedente de la línea inductora. Por tanto, de acuerdo con la ley de Lenz, se induce en el una fuerza electromotriz.

Es el efecto perturbador más importante (aunque, por supuesto, todos deben tenerse en cuenta). En el apartado 4 se describe el método de cálculo.

Las diferentes situaciones que se consideran son las siguientes.

- ❖ Cortocircuito: En el caso de un cortocircuito entre la catenaria y el suelo las corrientes que circulan por la línea de tracción inducen tensiones elevadas en la de comunicaciones, con riesgo para las personas.
- ❖ Régimen permanente: Durante el funcionamiento normal se estudian los dos casos siguientes:
  - a) La tensión inducida respecto del suelo a 50 Hz.
  - b) El ruido sofométrico, considerando los armónicos generados por la máquina.

### **Limites**

Los limite admisibles están regulados por las recomendaciones del CCITT [5], y son los siguientes:

1. Se admite que en el caso de que una persona este en contacto por una parte con tierra o con un conductor unido a tierra y por otra con los conductores de una línea de telecomunicación, el limite máximo de corriente por su cuerpo es de 10 mA, si esta se debe a la influencia eléctrica.
2. Se admite que existe peligro para una persona que este en la situación indicada en el caso anterior cuando la fuerza electromotriz longitudinal inducida es superior a 60 volts, estando la línea inductora en su funcionamiento normal.
3. Se admite que existe peligro para una persona que este en la situación indicada en el punto primero, cuando la fuerza electromotriz longitudinal inducida es superior a 430 volts., estando la línea inductora afectada de un cortocircuito entre la catenaria y el suelo.
4. La fuerza electromotriz sofométrica de ruido entre bornas en el extremo del abonado no debe sobrepasar el valor de lmv., calculado considerando la línea en funcionamiento normal y a partir de los armónicos generados por la máquina.

## MÉTODO DE CALCULO

### Simplificaciones

Las simplificaciones adoptadas son las siguientes:

(a) Las líneas, tanto del ferrocarril como telefónicas, se consideran como líneas quebradas a una altura constante sobre el nivel del suelo.

(b) La resistividad del suelo se considera constante en cada segmento.

(c) Se considera despreciable el efecto de la línea perturbada sobre la perturbadora.

(d) Se asume una situación cuasi-estática, que equivale a despreciar los retardos debidos a la velocidad finita de propagación de las ondas electromagnéticas.

### Inductancia mutua entre las líneas de tracción y telefónica

Según la teoría de imágenes y los trabajos de Carson y Dubanton [3], se supone que la corriente de retorno por tierra está concentrada en un plano ficticio a una profundidad  $p$  (compleja) bajo la superficie real de la tierra, siendo:

$$p = (l - j) \sqrt{6} / 2 \quad (6 = \text{profundidad de penetración}).$$

la expresión de la inductancia mutua por unidad de longitud es:

$h_i =$  Altura del hilo sobre el nivel del suelo.

$d_{k l} =$  distancia horizontal entre los hilos  $k$  y  $l$

### Cálculo de la tensión por cortocircuito

La fuerza electromotriz inducida en cada tramo de la línea telefónica [7] viene expresada por:

$$E = |Z_m| J l$$

siendo:

$Z_m =$  Inductancia mutua por unidad de longitud

$J =$  Corriente inductora en cortocircuito

$l =$  longitud del tramo inductor

El cálculo debe repetirse para todas las posibles posiciones del cortocircuito

Cálculo de la tensión en régimen permanente.

El cálculo es análogo al anterior, sin más que sustituir la corriente inductora por su valor en régimen permanente a 50 Hz y repetido para las posibles posiciones de la máquina del tren [6], [7].

### Cálculo del ruido sofométrico

#### Circuito equivalente de la línea perturbada

La línea telefónica se modeliza mediante un circuito de parámetros concentrados, que representa a los conductores y su retorno por tierra, más las impedancias y admitancias terminales. La longitud total se divide en  $n-1$  células (ver fig. 2) de longitud inferior a 500 m. y con longitudes y parámetros diferentes.

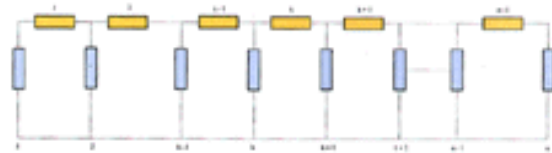


Figura 2. Subdivisión en células

Cada célula se representa mediante un circuito en  $p_i$ , tal como se indica en la figura 3, siendo:

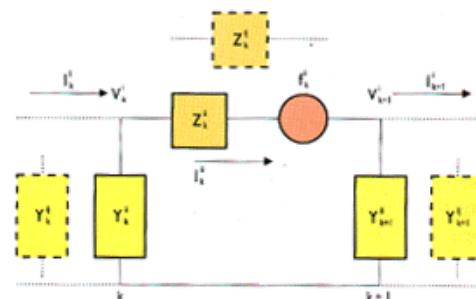


Figura 3. Circuito equivalente de una célula

$[I]_k$  Vector de corrientes longitudinales en la sección  $k$

$[V]_k$  Vector de potenciales en la sección  $k$

[ F ] k Vector de f.e.m. longitudinales inducidas en la sección k

[ Z ] k Matriz de impedancias en la sección k

[ Y ] k Matriz de coeficientes de admitancia en la sección k

El vector de f.e.m. Longitudinales correspondientes a cada armónico se calcula con el mismo procedimiento que el indicado en el cálculo de la tensión en régimen permanente, considerando que la impedancia mutua y la corriente inductora dependen de la frecuencia y por tanto serán distintas para cada uno de los armónicos [6].

Los elementos pasivos del circuito equivalente, matrices [Z] e [Y], se calculan siguiendo el criterio de comparación de energía, es decir, la energía del sistema real, expresada mediante la formulación de campos, debe coincidir con la del circuito equivalente expresada mediante sus parámetros.

Relacionando ambas formulaciones aplicadas a la geometría del cable telefónico, y con las simplificaciones antes indicadas, se obtienen [4] [6] los valores de los diferentes elementos pasivos del circuito equivalente.

### Cálculo sobre el circuito equivalente

Considerando las n-l secciones (fig. 2), se deduce que:

$$[ Z ] k [ I ] k [ V ] k - [ V ] k+1 + [ F ] k \quad (k = 1, \dots, l-1)$$

Dados los n nodos, tenemos que:

$$[ Y ] k [ V ] k = [ I ] k \quad (k = 1, \dots, l-1)$$

$$[ Y ] k [ V ] k = [ I ] k-1 - [ I ] k \quad (k = 2, \dots, l-1)$$

$$[ Y ] n [ V ] n = [ I ] n-1$$

Las expresiones anteriores conducen a un sistema de ecuaciones, cuya solución nos proporciona el valor de la tensión en cada nodo. Puesto que la matriz [ F ], en cada tramo, es función de la corriente perturbadora que lo genera, el sistema debe resolverse para cada uno de sus armónicos.

El ruido sofométrico  $V_{so}$  en ambos extremos de la línea, vendrá dado por la fórmula:

Siendo:

- $p$  coeficiente de peso sofométrico a la frecuencia  $f$ .
- $P$  800 peso sofométrico a 800 Hz.
- $V$   $f$  diferencia de tensión entre los dos hilos del par telefónico

### HERRAMIENTA DE CÁLCULO

Los cálculos de los diferentes efectos perturbadores, se han implementado en un programa de ordenador, denominado TAV - SUR, escrito en FORTRAN - VAX.

Este programa de ordenador permite, a partir de los datos de entrada (geometría, cable telefónico, admitancias terminales, corrientes perturbadoras, conductividad del terreno, etc.), calcular la tensión inducida para las diferentes posiciones del cortocircuito y de la máquina, el ruido sofométrico en ambos extremos de la línea y el potencial de tierra a una cierta distancia de la línea de tracción.

En el documento [2], denominado Manual de Utilización, se describe el método para efectuar los cálculos y el formato de los ficheros correspondientes.

El programa consta de las siguientes partes:

#### a).- Procedimiento de comandos.

Permite visualizar en pantalla las diferentes opciones, seleccionar la opción deseada y encaminar el programa hacia la realización de los cálculos seleccionados.

#### b).- Programas de cálculo.

Permiten realizar los cálculos correspondientes a cada opción. Se describen en el manual de utilización.

Algunos resultados aparecen por pantalla, aunque todos, y de forma completa, se recogen en un fichero con objeto de que puedan ser consultados por el usuario.

En relación con la opción que realiza los cálculos de la inducción magnética sobre la línea de telecomunicación, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

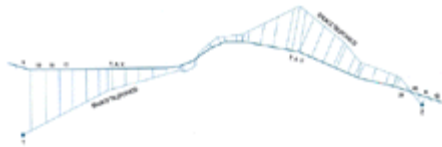
- Para el programa TAV - SUR son datos de entrada las corrientes inductoras en cada tramo, en cortocircuito y en régimen permanente y para cada posible posición del cortocircuito o de la máquina. Las corrientes inductoras deben ser suministradas por RENFE, ya que dependen de las características de la línea de tracción.
- Los armónicos generados por la máquina que TAV-SUR considera, son los suministrados por RENFE [ 1 ].

En caso de que los filtros que incorpora la máquina fueran distintos o fuera otra la máquina de tracción, debe modificarse el fichero correspondiente, según se indica en el manual de utilización.

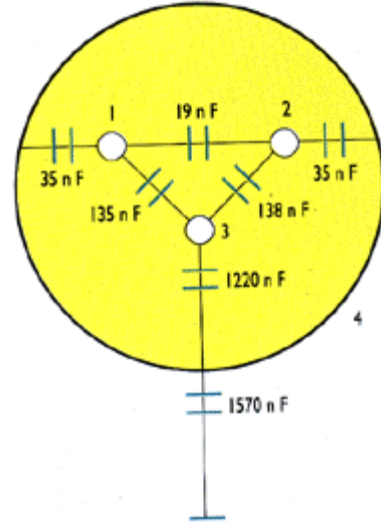
- Los parámetros Z e Y y las impedancias terminales utilizados en TAV- SUR responden al modelo experimental desarrollado en Francia y que al parecer les proporciona resultados aceptables en comparación con las medidas de campo que han realizado.

## APLICACIONES

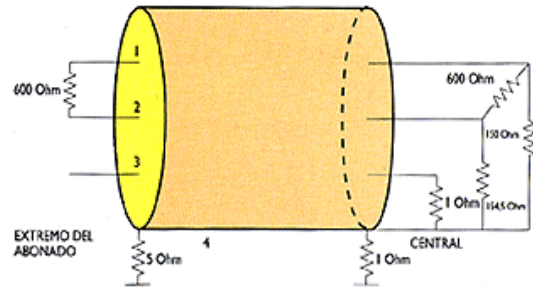
La fig. 4 muestra la disposición de la línea de tracción eléctrica (TAV) y la telefónica (TZ-3) en un tramo de la futura línea Madrid Sevilla. En este tramo se han realizado los estudios que se describen a continuación, lo cual constituye un ejemplo de aplicación del método de cálculo.



**Figura 4. Disposición relativa TAV/ Línea Telefónica**

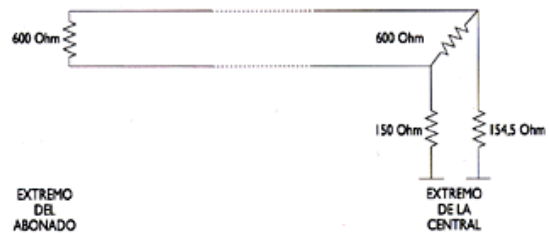


**Figura 5. Capacidades distribuidas.**



**Figura 6. Impedancias terminales (cable)**

Se han supuesto los casos de cable (fig. 5 y fig. 6) y de línea aérea de hilo desnudo (fig. 7).



**Figura 7. Impedancias terminales (hilo desnudo)**

Los cálculos realizados se dividen en dos apartados:

- En el primero se estudia la influencia sobre el ruido sofométrico del desequilibrio terminal o de línea (capacitivo o resistivo).

- En el segundo se estudia la distribución de tensiones a lo largo de los nodos en los que se ha dividido la línea de telecomunicación.

### Estudio del ruido sofométrico

Las fig. 8 y 9 muestran los valores de ruido sofométrico en función del desequilibrio capacitivo. La fig. 10 muestra dicho ruido sofométrico en función del desequilibrio terminal.

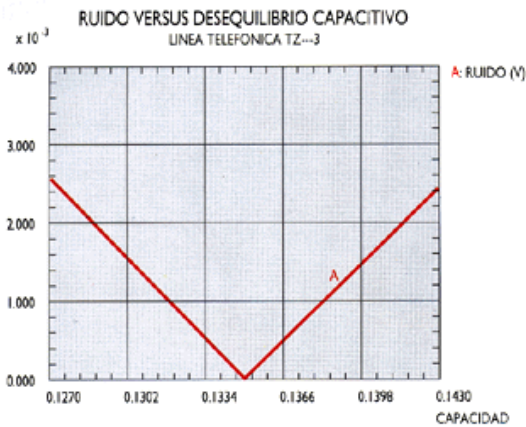


Figura 8. Ruido/ desequilibrio capacitivo (cable)

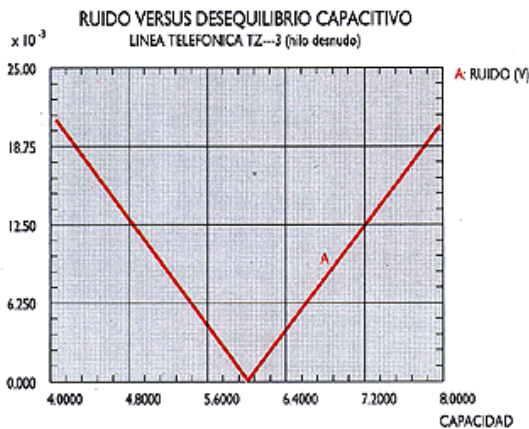


Figura 9. Ruido/ desequilibrio capacitivo (hilo desnudo)

De las gráficas anteriores se deduce que:

- El ruido es nulo cuando la situación es de equilibrio. Era previsible ya que es precisamente el desequilibrio el que transforma las tensiones longitudinales en

transversales, que son las percibidas en el terminal del usuario.

- Se puede observar la importancia que va a tener el desequilibrio terminal o de las líneas de las instalaciones situadas en las proximidades del trazado del TAV.
- El ruido es mayor en la situación de línea aérea de hilo desnudo que en el caso de cable.

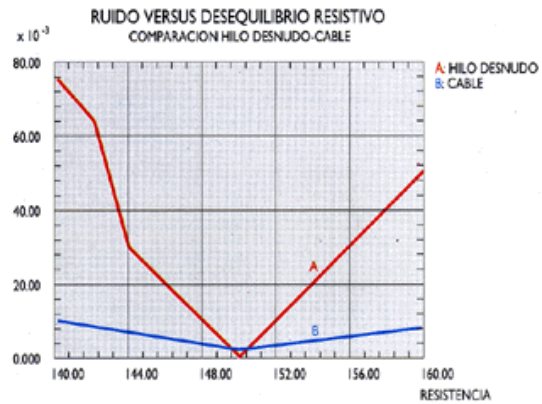


Figura 10. Ruido/desequilibrio resistivo

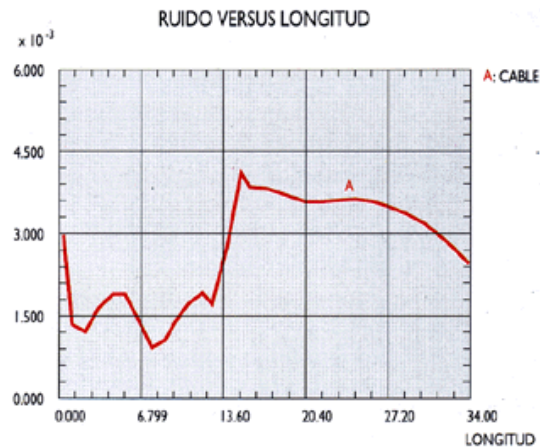
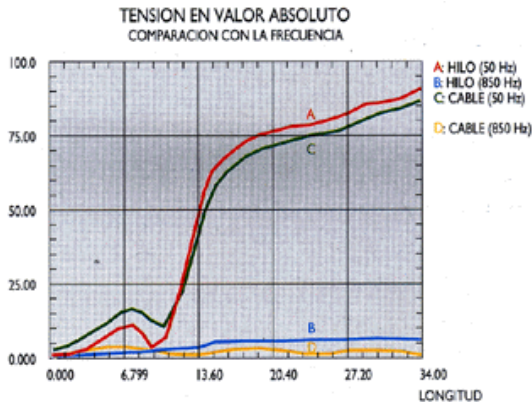


Figura 11. Ruido/Longitud

### Estudio de las tensiones a lo largo de la línea.

La fig. 11 muestra los valores de ruido sofométrico entre los hilos del par a lo largo de la línea de telecomunicación, en el caso de un cable con desequilibrio terminal ( $Y(8) = 1 / 154,5 \text{ mho.}$ ) y de línea ( $Cx = 138 \text{ nF}$ ).

La fig. 12 muestra los valores de tensión respecto de tierra en los diferentes nodos de la línea en los casos de cable e hilo desnudo, para la frecuencia de 50 Hz. y de 850 Hz.



**Figura 12. Tensiones absolutas/longitud**

El programa de cálculo permite evaluar la distribución de tensiones a lo largo de la línea. Esto es especialmente importante a la hora de definir las necesarias protecciones frente a elevaciones de potencial superiores a las indicadas en los límites definidos por el CCITT, ya que permite detectar el tramo y zona realmente problemático, optimizando la solución.

### **CONCLUSIONES**

El objetivo final del programa es obtener un soporte adecuado para evaluar las interferencias y las soluciones adoptadas para cumplir los límites especificados.

Se ha realizado un estudio teórico de los diferentes efectos perturbadores y del procedimiento de cálculo. Se ha desarrollado un programa de ordenador que permite calcular los niveles de interferencia.

Actualmente se están estudiando las protecciones idóneas frente a cada tipo de problema y en las diferentes situaciones posibles en planta, y está prevista la realización de medidas de campo.

De los primeros estudios se deduce que se van a obtener en muchos casos niveles de tensión y/o de ruido sofométrico superiores a

los permitidos por el CCITT, lo que obligará a modificar en su caso la red telefónica incluyendo elementos de protección.

En relación con el ruido sofométrico, el estudio realizado demuestra que es posible evaluar de forma cuantitativa la importancia del desequilibrio terminal o de línea en un caso práctico.

Es fundamental poder realizar un cálculo productivo que permita localizar el posible lugar y tipo de problema, sirviendo de soporte a la planificación de nuevas líneas, optimizando su diseño tanto desde el punto de vista técnico como económico.

### **REFERENCIAS**

1. Telefónica I+D: "Proyecto de estudio de la compatibilidad electromagnética en el entorno del Tren de Alta Velocidad", Informe de la Fase 1, Sep., 1989
2. Telefónica I+D: "T.A.V. - SUR, Manual de uso provisional", Sep., 1989
3. A. Deri y G. Tevan, "Mathematical verification of Dubanton's simplified calculations of overhead transmission line parameters and its physical interpretation", Archiv f,r Elektrotechnik 63 ( 1981 ) pp. 191-198.
4. Ramo, "Campos y Ondas", Pirámide SA, 1974
5. CCITT: " Directives concernant la protection des lignes de Telecommunication contre les actions nuisibles des lignes electriques ", ed. 1963
6. CCITT: " Directives concerning the protection of Telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railways lines ", volumen III, draft 1988.
7. Telefónica Sub. Gen. Tecnología "Protección de las líneas de telecomunicación contra las inducciones originadas por la corriente de cortocircuito entre una fase de una línea de energía y tierra", Norma técnica nt.f7.00 1, dic. 1985.