

Curvas horizontales en los trazados ferroviarios^(*)

Por JOSE A. ESCOLANO PAUL

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Como continuación al estudio del mismo autor sobre «Curvas verticales en los trazados ferroviarios» publicado en otro número de septiembre de 1987 (págs. 537-542) se analiza a continuación el trazado de curvas horizontales, analizándose el tránsito por las curvas y las fórmulas a aplicar en curvas con o sin peralte, curvas de transición, longitudes de las mismas, velocidades y demás características geométricas y de circulación.

1. EL TRANSITO POR LAS CURVAS

En principio el trazado, en planta, de un ferrocarril lo constituyen alineaciones rectas enlazadas entre sí por curvas circulares.

Durante el tránsito, a velocidad constante, por una curva circular, el vehículo está sujeto a una aceleración «a» invariable.

El valor «a» viene dado por la fórmula:

$$a = \frac{V^2}{3,6^2 R}$$

a = Aceleración centrífuga en m/s²

V = Velocidad del vehículo en Km/h.

R = Radio de la curva en m.

Si esta aceleración se mantiene inferior a un determinado valor, los viajeros, aún incluso los que van de pie, no experimentan sensación alguna de incomodidad.

Por otro lado, se ha comprobado que los esfuerzos y mayor desgaste que en el hilo alto se producen, son perfectamente tolerables por el carril, fijación y restantes elementos constituyentes del armamento de la vía, cuando «a» se mantiene dentro de los límites exigidos por el confort.

Las experiencias realizadas, ponen de manifiesto que para un viajero, vaya sentado o de pie, la marcha se desarrolla confortablemente si la aceleración en el plano de rodadura «a» se man-

tiene por debajo de 0,60 m/s² a 0,80 m/s². En determinadas ocasiones y circunstancias, se puede llegar a admitir que «a» alcance valores próximos a 1,00 m/s², pero esto no es aconsejable.

RENFE admite para «a» un valor límite de 0,65 m/s² en el plano de rodadura, lo cual, con un coeficiente de mayoración de 1,4, supone que el viajero soporta una aceleración de 0,91 m/s², valor éste perfectamente aceptable, según pruebas efectuadas por la SNCF^(*), que dan para el viajero sentado muy buen confort cuando, durante el viaje, se ve sometido a aceleraciones inferiores a 0.1 g.

Con independencia de lo anterior, se ha observado que al pasar el vehículo por los puntos de tangencia, entre las alineaciones rectas y curvas, los viajeros experimentan acciones molestas que repercuten en el confort y el material golpes que inciden en la conservación.

Este fenómeno se debe al hecho de aparecer o cesar bruscamente, en la tangente de entrada o de salida, la aceleración «a», ello equivale a decir que también debe permanecer dentro de unos límites el valor da/dt.

Los ensayos anteriormente citados de la SNCF, consideran aceptable el confort cuando dicha variación se mantiene inferior a 0,5 m/s³.

En general, el valor 0,4 m/s³ es ampliamente aceptado; los criterios más restrictivos fijan cifras del orden de 0,20 m/s³ y los más abiertos siempre mantienen este valor por debajo de

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de agosto de 1988.

(*) J. ALIAS—La Voie Ferrée.

0,7 m/s³. El profesor García Lomas en su Libro «Tratado de Explotación de Ferrocarriles» recomienda el valor 0,3 m/s³. En RENFE se ha venido admitiendo como valor límite una cifra del orden de 0,4 m/s³.

2. CURVAS SIN PERALTE

Mantener la aceleración «a» dentro de los límites indicados en el apartado anterior, obliga a circular por las alineaciones curvas con velocidades relativamente bajas.

Por este motivo el plano de la vía se inclina transversalmente, elevando el hilo exterior respecto al interior, es decir peraltando. De esta forma se establece, según el plano de rodadura, una componente del peso que contrarresta, total o parcialmente, la de la fuerza centrífuga y como consecuencia permite aumentar la velocidad de tránsito en las curvas.

El valor límite de la inclinación del plano de la vía, la máxima velocidad alcanzable, serán objeto de desarrollo en posteriores apartados. No obstante, se ha considerado conveniente dedicar este apartado a fijar la velocidad límite a la que es posible circular por una curva sin peralte, ya que a veces es aconsejable, en estaciones de cercanías con circulación de trenes semidirectos, en montajes de desvíos y escapes, mantener el plano de la vía horizontal, es decir no peraltar las curvas en determinados casos y circunstancias.

Teniendo en cuenta el valor límite aceptado por RENFE para «a», de 0,65 m/s², resulta:

$$0,65 = \frac{V^2}{12,96 R} \rightarrow V = 2,9\sqrt{R}$$

V = Velocidad vehículo en Km/h.

R = Radio de la curva en m.

Fórmula que da la velocidad límite «V», que es posible alcanzar en una curva de radio «R» manteniendo el plano de rodadura horizontal.

Si se adopta para «a» el valor extremo de 0,8 m/s², la fórmula anterior se transforma en:

$$V = 3,2\sqrt{R}$$

VELOCIDAD ADMISIBLE EN CURVAS SIN PERALTE

R en m.	V en Km/h.		
	a = 0,60 m/s ²	a = 0,70 m/s ²	a = 0,80 m/s ²
500	62	67	72
750	76	82	88
1.000	88	95	102
1.500	108	117	125
2.000	125	135	144
2.500	139	151	161
3.000	153	165	176

En el cuadro adjunto queda reflejada la velocidad admisible en curvas sin peralte, para diversos radios y valores del parámetro «a».

3. CURVAS DE TRANSICION

Al pasar los vehículos por los puntos de tangencia entre alineaciones rectas y curvas, los viajeros experimentan acciones molestas que repercuten en el confort y el material golpes que inciden en la conservación. Ello se debe al hecho de aparecer o cesar bruscamente, en la tangente de entrada o de salida, la aceleración «a», porque un trazado formado por alineaciones rectas y curvas es un trazado de curvatura 1/r discontinua y en él se pasa bruscamente de una curvatura 0, en la alineación recta, a la curvatura 1/R en la curva circular.

Para eliminar este fenómeno se requiere un trazado de curvatura continua, es decir introducir entre las alineaciones rectas y las curvas circulares, otras cuya curvatura varíe continuamente de 0 a 1/R, siendo «R» el radio de la curva circular.

Estas curvas se denominan curvas de transición. En su punto de contacto con la alineación recta deben anularse, tomando esta alineación como eje de abscisas, las derivadas 1.^a y 2.^a, para que además de ser tangente a dicha alineación recta, su curvatura sea nula en dicho punto. Asimismo en el punto de contacto con la curva circular, la derivada 1.^a y la derivada 2.^a de la curva de transición deben ser iguales a las de aquella, de esta forma ambas curvas tendrán la misma tangente y curvatura en él.

El problema admite infinitas soluciones, pero hay dos factores que indican en su elección:

- La ley de variación de la curvatura tiene que ser sencilla.
- La curva elegida debe admitir fácil replanteo sobre el terreno.

Renfe ha elegido como curva de transición la clotoide, cuya característica fundamental es la variación lineal de la curvatura con el desarrollo de la curva.

$$K = l \times r$$

l = longitud de desarrollo desde el origen a un punto determinado.

r = radio de curvatura en dicho punto.

K = constante característica de la curva.

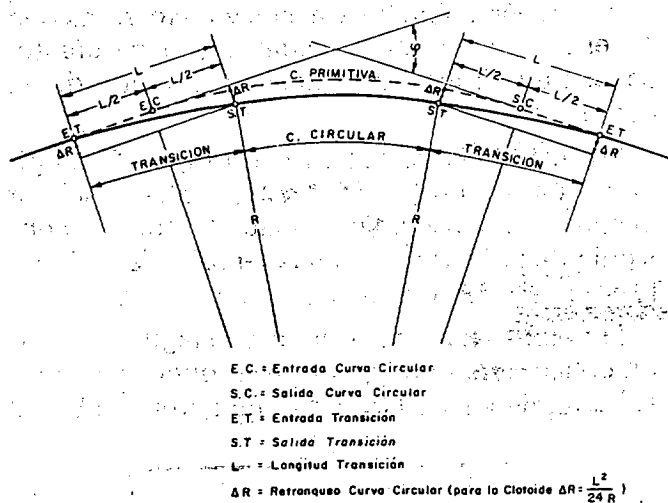


Figura 1.

4. LONGITUD DE LA TRANSICION EN LAS CURVAS SIN PERALTE

Adoptada la clotoide como curva de transición, se trata de definir su longitud para que da/dt se mantengan dentro de los límites considerados como aceptables, según se indicó en el Apartado 1.

Para calcular la longitud «L» que debe tener la transición de forma que la sobreaceleración da/dt se mantenga dentro de los límites indicados, cuando se circula a una velocidad uniforme «V», siendo «R» el radio de la curva circular, se procede de la siguiente forma:

Recordando que la propiedad fundamental de la clotoide es $r.l = K$ y teniendo en cuenta que «K» es igual a $R.L$, de acuerdo con las hipótesis establecidas, resulta:

$$L.R. d(1/r) = dl \quad [1]$$

Por otro lado, si «r» es el radio de curvatura en un punto de la transición, situado a «l» de su iniciación, el valor de la aceleración centrífuga en dicho punto será:

$$a = \frac{V^2}{12,96 \cdot r}; \quad da = \frac{V^2}{12,96} d(1/r) \quad [2]$$

Eliminando el valor $d(1/r)$ en las expresiones (1) y (2), se obtiene:

$$dl = \frac{12,96 LR}{V^2} da$$

Dividiendo ambos miembros por dt , resulta:

$$\begin{aligned} \frac{da}{dt} &= \frac{V^2}{12,96 LR} \times \frac{dl}{dt} = \\ &= \frac{V^2}{12,96 LR} \times \frac{V}{3,6} = \\ &= \frac{V^3}{46,6560 LR} \end{aligned}$$

$$\frac{da}{dt} = \frac{V^3}{46,6560 LR}$$

o también

$$\frac{da}{dt} = a_c \frac{V}{3,6 L}$$

$$\text{siendo } a_c = \frac{V^2}{12,96 R}$$

Fórmulas que nos dan la sobreaceleración en función de:

V = Velocidad del vehículo en Km/h.

R = Radio de la curva en m.

L = Longitud de la transición en m.

a_c = Aceleración centrífuga en la curva circular en m/s^2 .

Teniendo en cuenta que para la aceleración se admite valores comprendidos entre 0,6 y 0,8 m/s² y que para la sobreaceleración se admiten valores entre 0,3 m/s³ y 0,5 m/s³, resulta aconsejable adoptar para «L» valores comprendidos entre 1/3 V y 3/4 V.

En el cuadro adjunto se han obtenido los valores de la longitud de la transición en m. en función de «V» o de «R», para diferentes valores de la sobreaceleración, adoptando para «a_c» un valor de 0,65 m/s².

da/dt	L en m // V en Km/h.	L en m // R en m
0.2	L = 0,9028 V	L = 2,6203 $\sqrt{R}$
0.3	L = 0,6019 V	L = 1,7469 $\sqrt{R}$
0.4	L = 0,4514 V	L = 1,3102 $\sqrt{R}$
0.5	L = 0,3611 V	L = 1,0482 $\sqrt{R}$

5. CARACTERISTICAS GEOMETRICAS DE CURVAS SIN PERALTE

De acuerdo con lo expuesto en los apartados anteriores y adoptando para «a» un valor de 0,65 m/s² y para da/dt un valor de 0,4 m/s³, en Renfe se admite circular sin peralte en curvas de radio «R» a una velocidad dada por la fórmula:

$$V = 2,9 \sqrt{R}$$

La curva circular debe de ir dotada de transición, cuya longitud viene dada por la fórmula:

$$L = 0,45 V$$

En la práctica y para garantizar la suavidad en la marcha se recomendaría adoptar para «V» el valor obtenido a partir de la fórmula:

$$V = 2,8 \sqrt{R}$$

que garantiza una «a_c» inferior a 0,6 m/s² y para «L» el valor obtenido por la fórmula:

$$L = 0,60 V$$

que garantiza una da/dt inferior a 0,4 m/s³,

para una «a_c» de 0,8 m/s², ó a 0,3 m/s³, para una «a_c» de 0,65 m/s².

6. EL PERALTE

En una curva la fuerza centrífuga que actúa en el centro de gravedad del vehículo viene dada por la fórmula:

$$F = P \frac{V^2}{127 R}$$

F = Fuerza centrífuga en Tn.

P = Peso del vehículo en Tn.

V = Velocidad del vehículo en Km./h.

R = Radio de la curva en m.

Esta fuerza actúa no solo sobre el vehículo, sino también sobre los viajeros y mercancías que en él se encuentran, lo cuales, por su efecto, se sienten impelidos hacia el exterior de la curva.

Por otro lado, la fuerza centrífuga «F» origina un par de brazo «B», Fig. 2., que descarga el carril interior y carga el exterior, con los consiguientes efectos en la suspensión del vehículo y en el armamento de la vía.

El peralte tiene por objeto conseguir, elevando el hilo exterior respecto al interior, que la resultante de las dos fuerzas que actúan sobre el

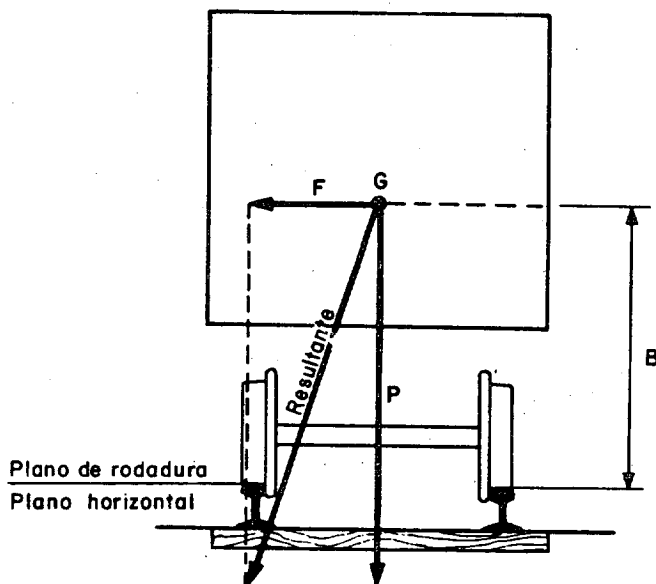


Figura 2.

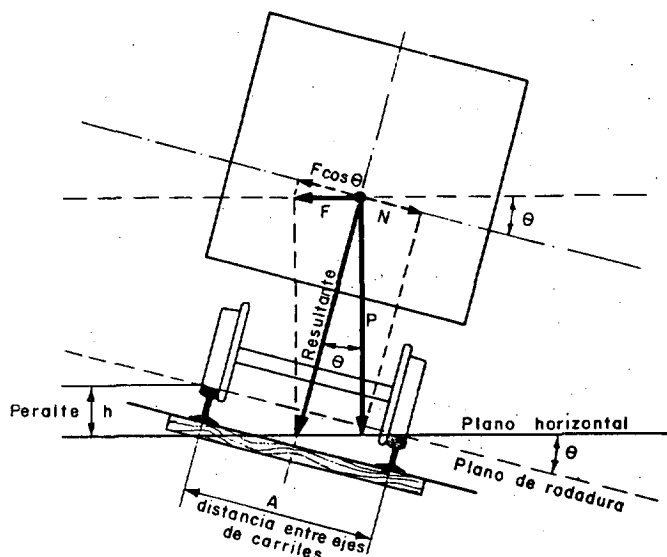


Figura 3.

vehículo, su peso «P» y la fuerza centrífuga «F», aplicadas en el centro de gravedad del mismo, sea normal al plano de rodadura. Fig. 3.

Para que esto suceda, las proyecciones de ambas fuerzas sobre un plano, paralelo al de rodadura, deben ser iguales en valor absoluto y opuestas de sentido.

Como consecuencia de ello, al anularse la componente de la fuerza centrífuga en el plano de rodadura, desaparecen los efectos que provoca y será posible aumentar la velocidad «V» de tránsito por las curvas.

Si designamos por «h» la elevación del hilo exterior respecto al interior (peralte), medida en mm., y por «A» una longitud igual al ancho de vía más dos veces el semiancho de la cabeza de los carriles, también medida en mm., se tiene:

$$\operatorname{sen} \theta = \frac{h}{A} = \frac{h}{1668 + 70}$$

Por otro lado, si llamamos «N» a la componente creada por el peso, según el plano de rodadura:

$$N = P \times \operatorname{sen} \theta$$

Ahora bien como «N» (componente del peso) debe ser igual a la proyección sobre el mismo plano de «F» (fuerza centrífuga), se

obtiene:

$$P \times \operatorname{sen} \theta = P \frac{V^2}{127 R} \times \cos \theta; \operatorname{tg} \theta = \frac{V^2}{127 R}$$

Teniendo en cuenta que, por consideraciones de índole práctica, el valor del peralte se limita y como consecuencia de ello el ángulo θ es del orden de 6° , es perfectamente válido adoptar para este cálculo:

$$\theta \# \operatorname{sen} \theta \# \operatorname{tg} \theta \text{ con error menor de } 0,0005.$$

Ello permite establecer:

$$\frac{h}{1.738} = \frac{V^2}{127 R}$$

de donde se obtiene:

$$h = 13,7 \frac{V^2}{R}$$

Peralte

Fórmula que da el peralte «h» en mm. en función de la «V» en Km./h. y del «R» en m.

7. EL PERALTE MAXIMO

Por motivos de tipo práctico, al peralte se le impone un valor máximo que no debe ser sobrepasado.

En general, se acepta que el valor del peralte máximo oscile entre 1/9 y 1/12 del ancho de vía.

El Profesor García Lomas aconseja no sobrepasar, con el peralte, el valor de 1/10 del ancho de vía. De acuerdo con las anteriores consideraciones, nada se opondría a la adopción de 170 mm., como valor del peralte máximo en España.

A continuación se indican los valores máximos que, en diversas administraciones, se adoptan para el peralte:

Nación *	Límite
España	160 mm.
Francia	160 mm.
Inglaterra	150 mm.
Alemania	150 mm.
EE.UU.	150 mm.
Rusia	150 mm.

(*) F. OLIVEROS.—«Vía».

En algunas líneas de alta velocidad, se han adoptado peraltes máximos mayores.

Francia	180 mm.
Japón (Tokaido)	200 mm.
Japón (Nueva línea Sanyo)	220 mm.

8. INSUFICIENCIA DEL PERALTE

Cuando a una curva se le da un peralte «h» inferior al de cálculo, al proyectar sobre un plano paralelo al de rodadura, queda una parte de la fuerza centrífuga «F» sin ser compensada por la componente «N» del peso «P» sobre el mismo plano.

Si se designa por «Z» la parte no compensada de la proyección de «F», resulta:

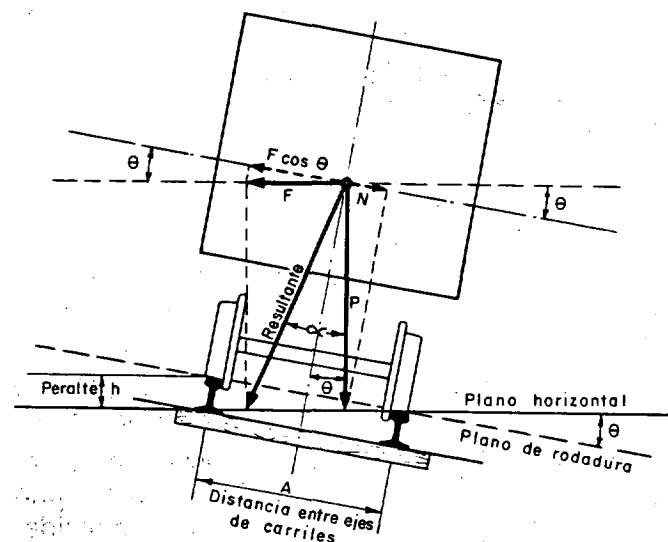


Figura 4.

$$Z = P \frac{V^2}{127 R} \cos \theta - P \sin \theta$$

Dividiendo ambos términos por la masa «M» del vehículo y designando por «z» el valor de la aceleración no compensada en el plano de rodadura, la fórmula anterior se transforma en:

$$z = g \frac{V^2}{127 R} - g \frac{h}{1.738} \quad [I]$$

Fórmula que da la aceleración no compensa-

da «z» en el plano de rodadura en m/s², cuando:

V = Velocidad de tránsito en Km./h.

R = Radio de la curva en m.

h = Peralte en mm.

g = Aceleración de la gravedad en m/s².

Recordando que el peralte de cálculo o teórico «h_t» viene dado por:

$$h_t = 1.738 \frac{V^2}{127 R}$$

La fórmula anterior se transforma en:

$$z = \frac{g}{1.738} (h_t - h)$$

que relaciona la aceleración «z» no compensada con la insuficiencia «I» de peralte.

$$I = h_t - h$$

$$z = 0,0056 I; I = 177 z \quad [II]$$

z = Aceleración no compensada en m/s².

I = Insuficiencia de peralte en mm.

Si en la fórmula (I) se despeja «h» en función de «z» se obtiene:

$$h = 13,7 \frac{V^2}{R} - 177 z \quad [III]$$

Teniendo en cuenta que en RENFE se adopta para «z» un valor máximo de 0.65 m/s², al entrar con dicho valor en la fórmula (III), se obtiene:

$$h = 13,7 \frac{V^2}{R} - 115$$

Es decir, el peralte real «h» de una curva no debe ser inferior al de cálculo disminuido en 115 mm.

Insuficiencia de peralte < 115 mm.

Si se admite para «z» un valor de 0.80 m/s²,

se obtiene, a partir de la fórmula (III), como valor para el peralte en una curva de radio «R»:

$$h = 13,7 \frac{V^2}{R} - 142$$

Es decir, el peralte real «h» de una curva no debe ser inferior al peralte de cálculo disminuido en 142 mm.

Los ensayos realizados por la SNCF consideran aceptable el confort, cuando el viajero está sometido a una aceleración continua inferior a 1,2 m/s².

Confort *	Valor de a _v en m/s ² para un viajero	
	sentado	de pie
Muy bien	1,0	0,85
Bien	1,2	1,00
Aceptable	1,4	1,20

(*) J. ALIAS: La Voie Ferrée.

Ello supone una aceleración «z» sin compensar en el plano de la rodadura del orden de 0,86 m/s², con un coeficiente de mayoración de 1,4.

Por lo tanto, adoptar como valor límite 0,80 m/s² para la aceleración sin compensar en el plano de rodadura, entra dentro de lo razonable, cuando se desea apurar las posibilidades de un trazado existente.

Como ya se ha dicho, en Renfe se ha adoptado para «z» el valor de 0,65 m/s² y para la insuficiencia de peralte «I» el valor límite de 115 mm.

9. MAXIMA VELOCIDAD EN UNA CURVA DE RADIO «R»

Si en la fórmula (I) despejamos «V» en función de «z» y «h», resulta:

$$V^2 = 12,92 z R + 0,073 h R$$

$$V = \sqrt{12,92 z + 0,073 h} \sqrt{R} \quad \text{[IV]}$$

La máxima velocidad la obtendremos para z = 0,65 m/s² y h = 160 mm. (valores máximos adoptados en España).

$$V \# 4,5 \sqrt{R}$$

De la experiencia internacional se desprende que pueden admitirse valores más altos, hasta de 1,0 m/seg², para la aceleración sin compensar en el plano de la vía.

A partir de los diversos valores, indicados como límites, y aplicando la fórmula (IV) se obtiene la fórmula:

$$V = K \sqrt{R}$$

que nos da la velocidad máxima para una curva de radio «R».

En el siguiente cuadro se han calculado los valores alcanzados por «K» para diversos valores de los parámetros «z» y «h».

K.			
«h» mm	160	170	180
«z» m/s ²			
0,60	4,4109	4,4929	4,5734
0,70	4,5554	4,6349	4,7130
0,80	4,697	4,774	4,850
0,90	4,833	4,907	4,982
1,00	4,965	5,038	5,110

La adopción para «K» de un valor del orden de 4,7, para apurar las posibilidades de un trazado existente, se considera suficientemente conservadora.

10. EXCESO DE PERALTE

El peralte de una curva de radio «R», ya se ha dicho, viene dado por la fórmula:

$$h = 13,7 \frac{V^2}{R}$$

Si para calcular el peralte se toma como valor de «V», la velocidad del tren de viajeros más rápido, evidentemente el confort está asegurado en este tren. Ahora bien, las ruedas, especialmente el borde activo de sus pestañas, de los trenes de mercancías, más lentos y pesados, incidirán fuertemente sobre el carril del hilo bajo y ello provocará:

— Un aplastamiento anormal y aparición de rebabas laterales en su cabeza.

- Una gran dificultad y a veces la imposibilidad de arrancar, cuando por cualquier circunstancia un tren haya tenido que pararse en una curva de radio inferior a 1.000 m.

Las circunstancias anteriormente expuestas, han hecho que las diversas Administraciones establezcan limitaciones al exceso de peralte, más restrictivas que para la insuficiencia.

La SNCF admite un exceso de peralte:

$$E = 100 - 0,5 T$$

que traducido al ancho de vía de RENFE se convierte en:

$$E = 116 - 0,58 T$$

en la que «T» es el valor de las Toneladas kilométricas brutas, remolcadas por Km. y día, en unidades de millar.

A continuación se ha calculado la «E» para diversos valores de «T»:

$$E = 116 - 0,58 T$$

T	10	20	30	40
E	110	104	99	93

En RENFE se adoptan para «E» valores que oscilan entre 110 mm. y 80 mm., según que el valor de «T» varíe entre 10 y 45 TKBR/Día. En Líneas de alta velocidad, para los trenes de viajeros ordinarios, el valor de «E» adoptado se rebaja en 20 mm.

La traducción de la fórmula francesa al ancho de vía de RENFE se hace por conservación del ángulo definido por el exceso de peralte.

$$\frac{100 - 0,5 T}{1.500} = \frac{P - q T}{1.738}$$

$$P = \frac{1.738}{1.500} 100 = 115,87$$

$$q = \frac{1.738}{1.500} 0,5 = 0,5793$$

11. LA VELOCIDAD EN UNA CURVA DE RADIO «R»

La fórmula:

$$V = 4,5 \sqrt{R}$$

da la máxima velocidad con que un tren puede circular por una curva de radio «R», cuando se admite para el peralte «h» un valor máximo de 160 mm. y para la aceleración sin compensar «z» un valor de 0,65/m/s².

Esta última condición supone admitir una insuficiencia de peralte de 115 mm.

Por otro lado, la fórmula:

$$V = 3,4 \sqrt{R}$$

da la máxima velocidad que puede ser alcanzada en una curva de radio «R» con peralte «h» de 160 mm. y aceleración sin compensar «z» nula.

Finalmente la fórmula:

$$V = 2,2 \sqrt{R}$$

fija la velocidad a la que puede circular el tren más lento en una curva de radio «R», dotada de 160 mm. de peralte, admitiendo 90 mm. de exceso de peralte.

En el cuadro de la página siguiente, quedan reflejados los valores de las citadas velocidades, para diversos radios «R».

Del cuadro y gráfico siguientes, se deduce que todo aumento de la velocidad del tren más rápido en un trayecto, arrastra inexorablemente una elevación de la velocidad del tren más lento.

12. EL PERALTE PRACTICO

Se dedujo que en una curva circular de radio «R» metros, por la que se circula a una velocidad «V» Km/h., el valor del peralte «H» venía dado por la fórmula:

$$H = 0,0137 \frac{V^2}{R}$$

H = en metros.
V = en Km/h.
R = en metros.

CURVAS HORIZONTALES EN LOS TRAZADOS FERROVIARIOS

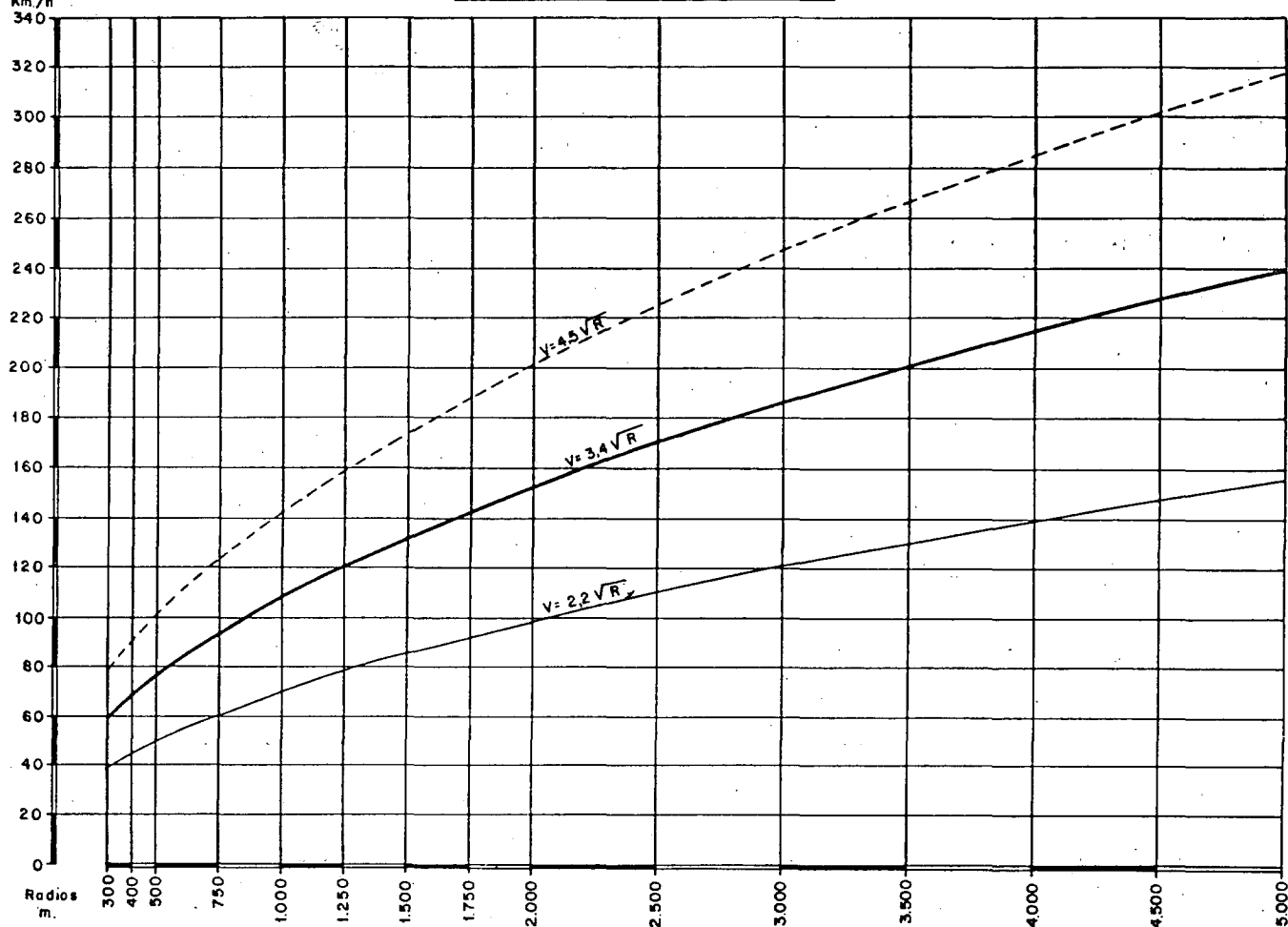
CUADRO DE VELOCIDADES

Peralte 160 mm.
 Insuficiencia de peralte 115 mm.
 Exceso de peralte 90 mm.

R (m)	300	400	500	750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000	4.500	5.000
$V = 2,2\sqrt{R}$ (Km/h.)	38	44	49	60	70	78	85	92	98	110	121	130	139	148	156
$V = 3,4\sqrt{R}$ (Km/h.)	59	68	76	93	108	120	132	142	152	170	186	201	215	228	240
$V = 4,5\sqrt{R}$ (Km/h.)	78	90	101	123	142	159	174	188	201	225	247	266	285	302	318

Velocidades
Km/h

GRAFICO DE VELOCIDADES



Este peralte debe ser considerado como «teórico» porque no todos los trenes circulan a la velocidad «V» admisible, por la curva de radio «R». Existe un elevado número de ellos, ya sean de viajeros o mercancías, que circulan a velocidades inferiores a «V» y por esta causa es usual que se adopte un peralte «práctico» inferior al

que se ha denominado «teórico».

Si se adopta para el peralte «práctico» un valor 2/3 del «teórico», la fórmula anterior se convierte en:

$$H = 0,0091 \frac{V^2}{R}$$

Este valor:

Peralte práctico = 2/3 Peralte tórico

ha sido tradicionalmente empleado en la SNCF y en RENFE; en otros Ferrocarriles se emplean procedimientos distintos para su cálculo.

Su valor, por consideraciones de orden práctico, no debe exceder de 160 mm, como ya se ha dicho en el Apartado 7.

La adopción de un peralte: «práctico» entraña:

- Para circulaciones rápidas: encontrarse con una insuficiencia de peralte, cuyo valor no debe sobrepasar los 115 mm.
- Para circulaciones más lentas: enfrentarse con un exceso de peralte cuyo valor «E» debe ser inferior a un cierto límite fijado, en consonancia con el tipo de tren y las características de la línea.

Estas ideas deben entrar en juego cuando se trate de fijar el valor del peralte «práctico» en una curva de radio «R», ya sea utilizando la fórmula:

$$H = 0,0091 \frac{V^2}{R}$$

siendo «V» la máxima velocidad admitida en la línea, ya sea utilizando la fórmula:

$$H = 0,0137 \frac{V^2}{R}$$

siendo «V» una velocidad de cálculo ponderada según las circulaciones existentes en la línea y sus propias características.

Cualquier procedimiento es aceptable si no olvidan los valores límites fijados para la insuficiencia «I» y el exceso «E» y se recuerda que siempre es más tolerable una insuficiencia que un exceso de peralte.

13. LA RAMPA DE PERALTE

De la estructura de la fórmula establecida para calcular el peralte:

$$H = 0,0137 \frac{V^2}{R}$$

Se desprende que, para «V» constante, el valor del peralte es directamente proporcional a la curvatura 1/R.

Como ésta varía a lo largo de la curva de transición, introducida entre la alineación recta y la curva circular, según una determinada ley, con arreglo a ella debe variar también el peralte, partiendo de un valor nulo al comienzo de la transición y alcanzando el valor «H» al terminar la misma.

Con la curva de transición adoptada en Renfe, clotoide, el peralte varía linealmente según la fórmula:

$$h = \frac{H}{L} \times l$$

Es decir, el peralte «H» se alcanza de una forma progresiva elevando poco a poco y de forma lineal el carril exterior a lo largo de la curva de transición, constituyendo lo que se denomina «Rampa de Peralte» que en el caso de la curva de transición clotoide es una rampa lineal.

En las rampas lineales la inclinación es constante. Si designamos su inclinación por m/1000 y es «H» el peralte en metros de la curva circular y «L» la longitud de la rampa en la misma unidad, es evidente que:

$$\frac{m}{1,000} = \frac{H}{L}$$

La experiencia aconseja que la inclinación de la rampa no exceda de 2,5 mm. por metro.

El Profesor García Lomas, en su libro «Tratado de Explotación de Ferrocarriles», recomendaba rampas de peralte del orden de 1 mm. a 2 mm. por metro.

El Profesor Crespo, en sus apuntes sobre Trazado de Ferrocarriles, recomendaba cifras máximas para las rampas de peralte de 2,5 mm. por metro en las rampas en «S». En general, en sus trabajos al frente del Departamento de Estudios y Reconstrucciones exigía rampas de peralte inferior a 1,5 mm. por metro.

En RENFE, con mediciones efectuadas cada 3 m., se tolera un alabeo máximo de 6 mm., para una vía no recientemente tratada y con trenes circulando a velocidades inferiores a 120

Km/h. Para velocidades superiores, el alabeo permitido es de 5 mm., medido en las mismas condiciones.

Teniendo en cuenta los valores límite, citados en los párrafos anteriores, y que el alabeo, teóricamente, solo debe aparecer en las rampas de peralte, es evidente que para la inclinación de las mismas no deben admitirse valores superiores a cifras del orden de 2,0 a 2,5 mm. por metro. Este valor límite debe ser fijado en función de las características de la línea.

A continuación se exponen brevemente unos cálculos justificativos de las pendientes admisibles en las rampas de peralte, en función de la máxima velocidad «V» permitida en la línea.

Sea $h = f(l)$ la función que da el valor del peralte en un punto determinado de la curva de transición, en donde «h» es el valor del peralte en metros en dicho punto y «l» el desarrollo de la curva de transición, también en m., desde el origen hasta él.

Derivando respecto al tiempo, obtenemos:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{dh}{dl} \times \frac{dl}{dt} = f'(l) \times \frac{dl}{dt}$$

Teniendo en cuenta que la velocidad de tránsito por la curva se considera constante, si designamos por «V» el valor de dicha velocidad en Km/h., resulta:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{V}{3,6} f'(l)$$

Si designamos por «v» la velocidad de elevación de la rueda exterior de un eje respecto a la interior, resulta, según se ha deducido, que:

$$v = \frac{V}{3,6} f'(l)$$

En el caso de la clotoide, como la ley de variación del peralte viene dada por la fórmula:

$$h = \frac{H}{L} l$$

La velocidad de elevación «v», vendrá dada por la fórmula:

$$v = \frac{V}{3,6} \times \frac{H}{L}$$

v = Velocidad de elevación de la rueda exterior en m/seg.

H = Peralte de la curva circular en m.

L = Longitud de la transición en m.

V = Velocidad del tren en Km/h.

Derivando la velocidad de elevación respecto al tiempo, se obtendrá la aceleración vertical de elevación de la rueda exterior.

Si designamos por «p» el valor de dicha aceleración, resulta:

$$p = \frac{dv}{dt} = \frac{V}{3,6} f''(l) \frac{dl}{dt} = \frac{V^2}{3,6^2} f''(l)$$

En el caso de la clotoide «p» = 0, siempre que las dos ruedas del vehículo se encuentren dentro de la curva de transición.

Sin embargo, «p» alcanza un valor determinado durante el intervalo de tiempo que transcurre desde que el primer eje del vehículo entra en la rampa de peralte hasta que lo hace el segundo.

Si designamos por «d» la distancia en metros entre ambos ejes, el tiempo empleado será:

$$t = \frac{d}{V} = \frac{3,6}{V} d$$

t = en segundos.

d = en metros.

V = en Km/h.

Durante este lapso de tiempo el primer eje se ha elevado $\frac{H}{L} d$ y por consiguiente su velocidad de elevación ha sido:

$$v = \frac{H}{L} d : \frac{3,6 d}{V} = \frac{H V}{3,6 L}$$

y su aceleración

$$p = \frac{H V}{3,6 L} : \frac{3,6 d}{V} = \frac{H V^2}{3,6^2 L d}$$

Para $d = 16 \text{ m}$.

$$p = \frac{H V^2}{207 L}$$

Si es $\frac{m}{1.000}$ la pendiente de la rampa de peralte:

$$\frac{H}{L} = \frac{m}{1.000} ; p = \frac{V^2}{207.000} m$$

En el siguiente cuadro quedan reflejados los valores que alcanza «p» para diversos valores de «V» y de «m».

p en m/s ³					
m	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
V					
140 Km/h.	0,0473	0,0947	0,1420	0,1894	0,2367
160 Km/h.	0,0618	0,1237	0,1855	0,2473	0,3092
180 Km/h.	0,0783	0,1565	0,2348	0,3130	0,3913
200 Km/h.	0,0966	0,1932	0,2899	0,3865	0,4831
220 Km/h.	0,1169	0,2338	0,3507	0,4676	0,5845
240 Km/h.	0,1391	0,2783	0,4174	0,5565	0,6957

Teniendo en cuenta que las aceleraciones verticales son tolerables si se mantienen por debajo de $0,5 \text{ m/s}^2$, en RENFE se aceptan valores del orden de $0,3 \text{ m/s}^2$, resultan las siguientes cotas máximas para las pendientes en rampa de peralte, en función de la velocidad:

Velocidad en Km/h.	Pendiente máx. en mm/m.
$v < 140$	2,5
$140 < V < 160$	2,0
$160 < V < 200$	1,5
$200 < V$	1,0

En RENFE se han adoptado como pendientes máximas $0,80 \text{ mm/m}$. para 200 km/h . y $0,65 \text{ mm/m}$. para 250 km/h .

14. GIRO DEL VEHICULO SOBRE SU EJE Y LONGITUD DE TRANSICION

Al entrar el vehículo en la curva de transición experimenta, debido a la elevación progresiva de la rueda exterior, un movimiento de giro, alrededor de su eje longitudinal, que incide en el confort.

Cuando la curva de transición es una clotoide, Apartado 13, la velocidad de elevación de la rueda exterior viene dada por la fórmula:

$$v = \frac{V}{3,6} \times \frac{H}{L}$$

v = en m/s.

V = en Km/h.

H = en m.

L = en m.

Se ha comprobado experimentalmente que cuando «v» se mantiene dentro de unos valores límites la influencia, de este movimiento de giro, en el confort es despreciable.

Las Normas alemanas prescriben para «v» valores inferiores a:

Normalmente:

$1/10 \text{ Km/h.} = 0,0278 \text{ m/s} \# 28 \text{ mm/s}$.

Se admite:

$1/8 \text{ Km/h.} = 0,0347 \text{ m/s} \# 35 \text{ mm/s}$.

En los Ferrocarriles Británicos se acepta:

Como normal:

$1/10 \text{ Km/h.} = 0,0278 \text{ m/s} \# 28 \text{ mm/s}$.

Valor límite:

$1/5 \text{ km/h.} = 0,0556 \text{ m/s} \# 55 \text{ mm/s}$.

En los Ferrocarriles Holandeses se acepta:

Como valor normal:

$1/8 \text{ km/h.} = 0,0347 \text{ m/s.} \# 35 \text{ mm/s}$.

En la SNCF se acepta:

Como normal: 50 mm/s .

En casos excepcionales: 60 mm/s .

En RENFE tradicionalmente se han venido aceptando los valores indicados por la DB., pero teniendo en cuenta el mayor ancho de vía existente, lo que provoca una menor velocidad de giro alrededor del eje longitudinal, recientemente se ha fijado la máxima velocidad de elevación

del peralte en 35 mm/s como valor normal en 45 mm/s como valor máximo.

Entrando con dichos valores en la fórmula:

$$v = \frac{V}{3,6} \times \frac{H}{L}$$

resulta para el valor:

$$35 \text{ mm/s.} \rightarrow L > \frac{VH}{3,6 \times 0,035} = 7,9365 \text{ VH}$$

$$45 \text{ mm/s.} \rightarrow L > \frac{VH}{3,6 \times 0,045} = 6,1728 \text{ VH}$$

H = en metros.

L = en metros.

V = en km/h.

En resumen, para que el movimiento de giro alrededor del eje longitudinal tenga una influencia despreciable en el confort, la longitud de la transición en una curva de radio «R» debe cumplir las condiciones siguientes:

Normalmente: $L \geq 8 \text{ VH}$

Excepcionalmente: $L \geq 6 \text{ VH}$

15. SOBREACELERACION Y LONGITUD DE TRANSICION

En los Apartados 8 y 13 se puso de manifiesto que si una curva se peralta con un valor «h», peralte práctico, inferior al teórico queda una parte de la aceleración centrífuga, sin compensar.

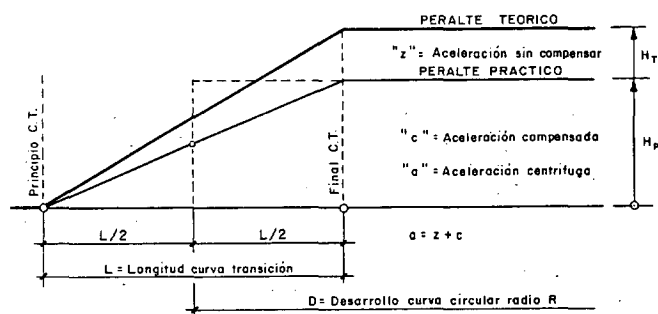


Figura 5.

L = Longitud de la transición.

D = Desarrollo de la curva circular.

I = Insuficiencia de peralte.

Esta aceleración sin compensar aumenta a lo largo de la curva de transición, linealmente cuando se trata de una clotoide con variación constante a lo largo de la misma (Fig. 5).

El valor de dicha variación, sobreaceleración, se puede determinar dividiendo la aceleración máxima sin compensar «z», correspondiente a la velocidad de tránsito del tren más rápido, por el tiempo que se tarda en recorrer la curva de transición a la misma velocidad.

Por otro lado se dedujo que la insuficiencia de peralte en metros viene dada por la fórmula:

$$I = 0,177 \text{ z}$$

I = Insuficiencia de peralte en metros;

z = Aceleración sin compensar en m/s².

Derivando ambos términos de la fórmula, respecto a tiempo, resulta:

$$\frac{dI}{dt} = 0,177 \frac{dz}{dt}$$

$\frac{dI}{dt}$ = Variación de la insuficiencia de peralte en el tiempo en m/s.

$\frac{dz}{dt}$ = Variación de la aceleración sin compensar en el tiempo en m/s³.

Parámetros que condicionan la calidad de la rodadura en las curvas de transición, pero interrelacionados entre sí.

En los siguientes cuadros se expresa numéricamente dicha interrelación:

$dz/dt - \text{m/s}^3$	$dI/dt - \text{m/s}$	$dz/dt - \text{m/s}^3$	$dI/dt - \text{mm/s}$
0,2	0,0345	0,2	35
0,3	0,0531	0,3	53
0,4	0,0709	0,4	71
0,5	0,0886	0,5	89

De acuerdo con lo indicado en el párrafo tercero de este apartado, si dividimos la insuficiencia final de peralte por el tiempo que tarda en recorrer la curva de transición el tren más rápido, se obtiene el valor de dI/dt , constante en la clotoide.

$$\frac{dI}{dt} = \frac{I}{3,6 \text{ L/V}} = \frac{I \times V}{3,6 \text{ L}}$$

De la fórmula anterior se desprende:

$$L = \frac{I \times V}{3,6 \, dI/dt}$$

Teniendo en cuenta que los valores de dI/dt pueden oscilar entre 30 y 60 mm/s, resulta:

dI/dt en mm/s.	L en metros
30	9,26 I.V
40	6,95 I.V
50	5,56 I.V
60	4,63 I.V

Fórmulas que dan la longitud de la transición «L», en metros, en función de la insuficiencia «I» de peralte, en metros, y de la velocidad «V» del tren más rápido, en Km/h., para diversos valores del parámetro dI/dt .

Si se adoptan para $\frac{dI}{dt}$ valores entre 30 y 60 mm/s, correspondientes a sobreaceleraciones del orden de 0,2 m/s³ a 0,4 m/s³, y para «I» el máximo valor admitido a 115 mm., se obtiene:

Para $\frac{dI}{dt} = 30 \text{ mm/s} \rightarrow L = 1,0 V$

Para $\frac{dI}{dt} = 60 \text{ mm/s} \rightarrow L = 0,5 V$

Fórmulas prácticas, fáciles de recordar, que acotan inferiormente la longitud de la transición en función de la «V» del tren más rápido en Km/h. con criterio bastante conservador en el primer caso y aceptable en el segundo.

BIBLIOGRAFIA

- Tratado de Explotación de Ferrocarriles.—J. M. García Lomas.
- Constitución de las alineaciones curvas.—A. Crespo.
- La Voie Ferrée.—J. Alias.
- Tratado de Ferrocarriles I, Vía.—F. Oliveros.

José A. Escolano Paul.

Nacido en Puerto Real (Cádiz) en 18-12-1926. Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. D.A.D.E. —IESE— 1971. Ingresó en RENFE en el año 1957 en donde ha prestado ininterrumpidamente sus servicios.

Ingresa como Ingeniero 2.º del Cuerpo de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos en la Dirección General de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas el 6 de abril de 1961, solicitando fuese declarado Supernumerario con objeto de continuar prestando sus servicios en la Red.

El 11 de Julio de 1961 fue declarado Supernumerario, situación en la que permaneció hasta el 6-10-86, en que queda en situación de excedencia.

Entre las actividades desarrolladas en la red se encuentran las siguientes:

1-07-57.—Ingeniero en Prácticas del Departamento de Estudios y Reconstrucciones; 1-07-61.—Fue nombrado Ingeniero Jefe de Vía y Obras de la 4.ª Zona (Valencia); 9-11-65.—Fue nombrado Director de la 4.ª Zona (Valencia); 24-6-69.—Se le concedió la categoría de Subdirector de la Red y fue trasladado a la 5.ª Zona (Barcelona), como Director de la misma; 1-7-72.—Fue nombrado Director Adjunto en la Dirección de Explotación, siendo trasladado a Madrid; 1-6-73.—Fue nombrado Director de Obras e Instalaciones; 2-05-78.—Fue nombrado Director del Area Técnica; 21-7-80.—Pasó a ser Director del Area de Inversiones, como consecuencia de la nueva estructura de RENFE; 1-6-81.—Se le nombró Inspector General, puesto que sigue desempeñando en la actualidad.

