

Un método para el cálculo de los parámetros fundamentales del sistema de control de la circulación en una línea férrea de vía doble no banalizada, dotada de bloqueo automático^(*)

Por MANUEL JOSE MEGIA PUENTE

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Se presenta una metodología de cálculo que tiene en cuenta la interdependencia existente entre los parámetros principales del sistema de control de la circulación en líneas férreas dotadas de bloqueo automático: número de aspectos de las señales, distancia entre señales y distancia entre apartaderos.

La base conceptual del método de trabajo propuesto descansa sobre la filosofía de dimensionamiento de una instalación, es decir, se trata de determinar los valores de una serie de parámetros, interdependientes entre sí, de forma que se asegure, en unas condiciones establecidas de antemano, la circulación de un cierto volumen de tráfico ferroviario, definido previamente, tanto en cuanto a número total de circulaciones como a su velocidad y reparto temporal a lo largo del día.

El método que se propone está enfocado principalmente en su desarrollo, tanto conceptual como práctico, a la aplicación en el caso de una organización del tráfico por paquetes de trenes, de acuerdo con las tendencias actuales de las empresas ferroviarias técnicamente más avanzadas a nivel mundial.

1. INTRODUCCION

Tanto en el proyecto integral de líneas nuevas como en el de las instalaciones de seguridad de líneas existentes, se suele plantear el problema de la elección del sistema de control de la circulación más adecuado desde el punto de vista de la inversión, la seguridad y la facilidad y fiabilidad de explotación de la línea. Una solución parcial a este problema se obtiene en el momento de la toma de decisión en relación con el tipo de instalación de seguridad a montar, decisión que se basa fundamentalmente en la consideración de la necesaria adecuación entre inversión, tipo y categoría del tráfico soportado por la línea y necesidades de explotación.

Sin embargo, una vez elegido el tipo de sistema de control de la circulación a instalar (bloqueo entre apartaderos, bloqueo automático, sistemas de mando continuo de la marcha de las circulaciones, etc.), es preciso definir con precisión los parámetros fundamentales del sistema elegido, con objeto de permitir su adecuación correcta al plan de explotación previsto.

En el presente trabajo se desarrolla un método de cálculo que tiene en cuenta la interdependencia existente entre los parámetros principales del sistema de seguridad, como son: número de aspectos de las señales, distancia entre señales y distancia entre apartaderos; estando enfocado asimismo principalmente a su aplicación en el caso de organización del tráfico por paquetes de trenes, de acuerdo con las tendencias actuales de las empresas ferroviarias técnicamente más avanzadas.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de abril de 1984.

2. FILOSOFIA BASICA

La base conceptual del método propuesto descansa sobre la filosofía del dimensionamiento de una instalación, es decir, se trata de determinar los valores de una serie de parámetros, interdependientes entre sí, de forma que se asegure, en unas condiciones prefijadas, la circulación de un cierto volumen de tráfico definido de antemano con relativa precisión, tanto en cuanto a número total de circulaciones como a su velocidad y reparto a lo largo del día.

De todas formas, el método no pierde en absoluto generalidad en el caso de una menor precisión de la definición del tráfico, objetivo para el cual se dimensiona, si bien, lógicamente, los valores de los parámetros obtenidos pueden no resultar los más adecuados para una hipótesis de explotación concreta que se aleje considerablemente de la adoptada para el cálculo.

3. FUNDAMENTO TEORICO

De una forma general, el gráfico de circulación entre dos apartaderos de una línea de vía doble no banalizada adopta, para un solo sentido de circulación, la forma indicada en la figura 1, en la hipótesis de mezcla de diversos trenes de tipos de velocidades $V_1, V_2, \dots, V_m$. En una explotación tradicional, el período de repetición del gráfico de circulación es de veinticuatro horas, pero en la actualidad se tiende a reducir el número de tipos de velocidad de los trenes a unos pocos casos diferentes, con lo que es posible concebir una explotación por paquetes de trenes de período inferior al de veinticuatro ho-

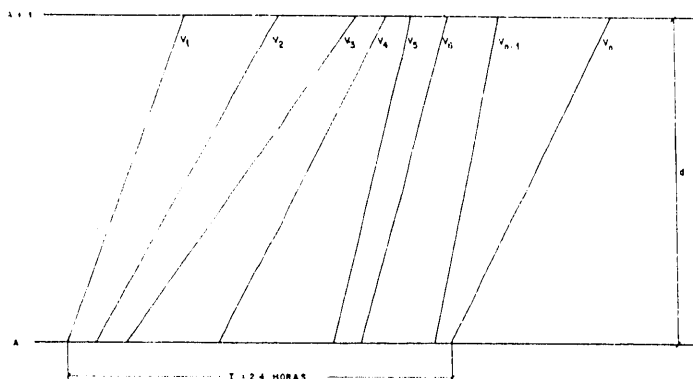


Fig. 1.—Gráfico general de circulación entre dos apartaderos consecutivos en explotación tradicional.

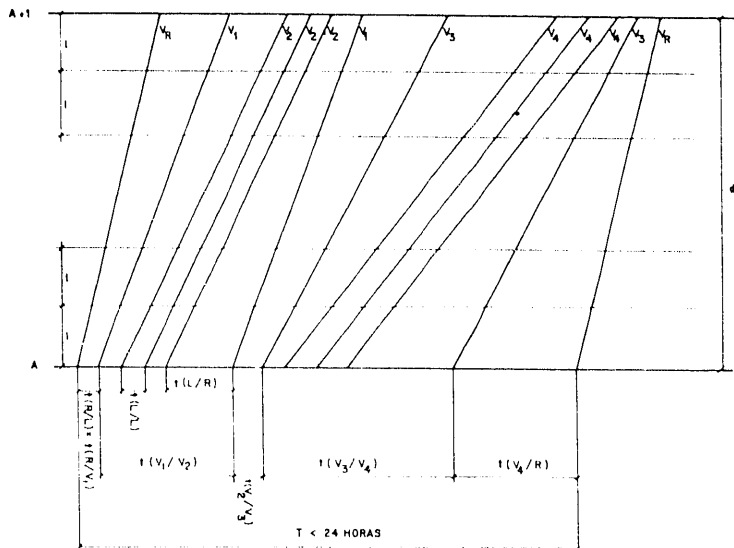


Fig. 2.—Gráfico de circulación entre apartaderos consecutivos con período inferior a veinticuatro horas.

ras, lográndose gráficos con el aspecto del presentado en la figura 2.

En los apartados siguientes, trabajando sobre un gráfico del tipo del de la figura 2, vamos a deducir las funciones que ligan los principales parámetros del sistema de control de la circulación con los propios de la explotación.

3.1. Tiempos de sucesión mínimos posibles entre trenes consecutivos.

Existen en principio tres tipos de tiempos de sucesión entre trenes consecutivos.

- Tren rápido seguido por uno lento.
- Trenes de igual velocidad.
- Tren lento seguido por uno rápido.

En los puntos siguientes procederemos al cálculo de los tiempos de sucesión mínimos para cada uno de los tres casos indicados, de acuerdo con la práctica de la explotación y las instalaciones de seguridad habituales en gran número de empresas ferroviarias. No se considera en los cantones de bloqueo en plena vía distancia de deslizamiento, es decir: el límite físico de cada cantón de bloqueo coincide con la situación de la señal.

3.1.1. *Tiempo de sucesión mínimo para un tren rápido seguido por uno lento.*

En este caso, dando por supuesto que se ha producido en el apartadero A el adelantamiento del tren lento por el rápido, el tiempo de sucesión mínimo se puede expresar de la forma:

$$t(R/L) = \frac{(m-1)l + l_R}{V_R} + t_a + t_b$$

siendo:

$t(R/L)$ = tiempo de sucesión mínimo (horas).

m = número de aspectos de las señales de bloqueo.

l = distancia entre señales de bloqueo (km.).

l_R = longitud del tren rápido (km.).

V_R = velocidad del tren rápido (km/hora).

t_a = tiempo de reacción necesario para dar y recibir la orden de marcha por el tren lento, que se halla parado en el apartadero A (horas).

t_b = tiempo necesario para la formación y destrucción de los itinerarios del apartado A y la liberación de las instalaciones de bloqueo (horas).

3.1.2. *Tiempo de sucesión mínimo entre dos trenes de igual velocidad.*

En este caso, ninguno de los dos trenes se supone parado en el apartadero A, y la expresión del tiempo de sucesión resulta:

$$t(R/R) = t(L/L) = \frac{(m-1)l + l_1 + l_{s2}}{V} + t_b$$

siendo:

$t(R/R) = t(L/L)$ = tiempo de sucesión mínimos (horas).

m, l y t_b como en apartado 3.1.1.

l_1 = longitud de tren precedente (km.).

l_{s2} = distancia de visibilidad para el tren siguiente (km.).

V = Velocidad común de ambos trenes (km/hora).

3.1.3. *Tiempo de sucesión mínimo para un tren lento seguido por uno rápido.*

En este caso se da por supuesto que al llegar al apartadero A + 1, el tren lento se detendrá para permitir su adelantamiento por el tren rápido, obteniéndose entonces la siguiente expresión para el tiempo mínimo de sucesión.

$$t(L/R) = \frac{(m-1)l + l_{SR}}{V_R} + t_m + t_b + d \left(\frac{1}{V_L} - \frac{1}{V_R} \right),$$

con:

$t(L/R)$ = tiempo de sucesión mínimo (horas).

m, l y t_b = como en los apartados 3.1.1 y 3.1.2.

l_{SR} = distancia de visibilidad para el tren rápido (km.).

V_R = velocidad del tren rápido (kilómetros/hora).

t_m = tiempo necesario para el apartado del tren lento sin interferir con el rápido (h), que será calculado en el subapartado 3.5.

d = distancia entre apartaderos contiguos (km.).

V_L = velocidad del tren lento (km/hora).

3.2. **Explotación por paquetes de trenes.**

En esta modalidad de organización de la explotación no presenta interés la sucesión aislada de los trenes, sino la consideración de los grupos de trenes de igual velocidad que circulan entre dos trenes de mayor velocidad que los anteriores, pero igual entre ellos, adoptando entonces el gráfico parcial una forma como la indicada en la figura 3. En este caso resulta interesante relacionar los parámetros tenidos en cuenta hasta ahora con el número de trenes lentos que pueden circular en el intervalo entre dos más rápidos. Se puede definir entonces la siguiente función:

$T_p = t(R/L) + (n-1) t(L/L) + t(L/R)$, la cual sustituyendo los valores de los apartados 3.1.1

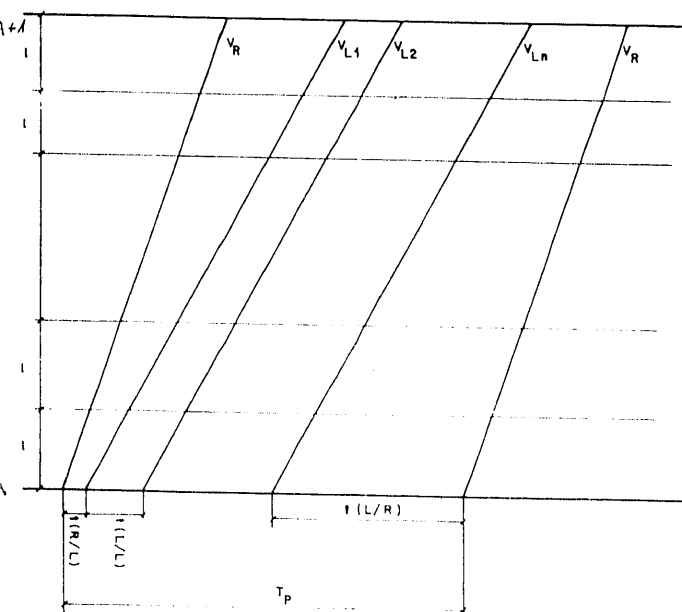


Fig. 3.—Gráfico de circulación entre dos apartaderos consecutivos en explotación por paquetes de trenes.

a 3.1.3 queda de la forma:

$$T_p = \frac{1}{V_R} [2(m-1)l + l_R + l_{SR} - d] + \frac{1}{V_L} \cdot [(n-1)[(m-1)l + l_L + l_{S2}] + d] + t_a + (n+1)t_b + t_m$$

expresión en la que:

t_p = período entre dos trenes rápidos (horas).

n = número de trenes lentos entre dos trenes rápidos.

y el resto de los parámetros tienen los significados expresados en los apartados 3.1.1 a 3.1.3.

3.3. Explotación en el caso general

A partir de las expresiones deducidas en los apartados 3.1 y 3.2 es posible establecer una formulación válida para un caso general que permite ligar el intervalo entre trenes rápidos, definitorios de un paquete de circulaciones, y el número de trenes, de diversas velocidades, que pueden circular en dicho intervalo.

Así pues, de acuerdo con la figura 2, se puede establecer:

$$T = t(R/V_1) + t(V_1/V_2) + \dots + t(V_N - 1/V_N) + t(V_N/R)$$

en la que T = intervalo entre dos trenes rápidos de igual velocidad (horas).

$t(i/j)$ = tiempos mínimos de sucesión de trenes de diversas velocidades entre los cuales puede existir uno o más T_p definidos como en el apartado 3.2.

3.4. Valores de los parámetros utilizados en el desarrollo.

A lo largo de los apartados 3.1 a 3.3 se han utilizado una serie de parámetros, de explotación de las instalaciones, cuyos valores admiten ciertos comentarios que efectuaremos a continuación.

Los parámetros utilizados han sido:

- Número de aspectos de las señales de bloqueo: m , cuyo valor normal suele ser tres (vía libre, anuncio de parada y parada), si bien en instalaciones más sofisticadas o adaptadas a la circulación de trenes velozes se adopta el valor cuatro.
- Distancia entre señales de bloqueo: l , cuyo campo de variación está definido entre 1.500 y 3.000 metros.
- Longitud de los trenes rápidos: l_R , cuyo valor puede tomarse del propuesto en la ficha UIC 405 R, «Método destinado a determinar la capacidad de las líneas» de enero de 1979, para trenes que circulan a velocidades superiores a 80 km/h., es decir: 400 metros.
- Velocidad de los trenes rápidos: V_R , cuyo valor será fijado en cada caso en función del plan de explotación.
- Tiempo de reacción necesario para dar y recibir la orden de marcha: t_a , cuyo valor, de acuerdo con la citada ficha UIC 405 R, se puede tomar como 0,4 minutos.
- Tiempo necesario para la formación y destrucción de los itinerarios y la liberación de las instalaciones de bloqueo: t_b , cuyo valor se puede tomar del siguiente cuadro, propuesto asimismo en la ficha UIC 405 R:

	VALORES DE t_b		
	Puesto mecánico (min.)	Puesto todo relés (min.)	Puesto todo relés con mesa de control óptico (min.)
Estación importante. . .	1,5	1,0	0,3
Estación poco importante.	1,0	0,5	0,0
Puesto de bloqueo . . .	0,5	—	—

- Distancia de visibilidad de las señales para trenes rápidos: l_{SR} , cuyo valor, de acuerdo con lo indicado en la ficha UIC 405 R, para trenes con velocidad superior a 80 km/h., se puede tomar como 500 metros.
- Tiempo necesario para el apartado de un tren lento sin interferir con uno rápido que le sigue: t_m , cuyo valor puede ser deducido de acuerdo con el desarrollo que incluimos en el apartado siguiente 3.5.
- Distancia entre apartaderos contiguos: d , cuyo valor depende de la explotación, pero que, en principio, deberá situarse entre 12 y 25 kilómetros.
- Velocidad de los trenes lentos: V_L , cuyo valor será fijado en cada caso en función del programa de explotación.
- Longitud de los trenes lentos: l_R , cuyo valor, de acuerdo con los datos en la ficha UIC 405, para trenes circulando a velocidades inferiores a 80 km/h., se puede tomar como 700 metros.
- Distancia de visibilidad de las señales para los trenes lentos: l_{SL} , cuyo valor, asimismo de acuerdo con lo indicado en la ficha 405 R, para trenes de velocidad inferior a 80 km/hora, se puede tomar como 200 metros.

3.5. Cálculo de los tiempos de apartado de trenes lentos

El cálculo de estos tiempos puede hacerse, de una forma general, suponiendo un valor igual para todos ellos deducido de la experiencia o de determinadas consideraciones; no obstante, teniendo en cuenta las condiciones normales de explotación es posible tratar de definir una expresión aritmética que proporcione valores teóricamente más exactos de estos tiempos.

La deducción de estas expresiones se basa en las ecuaciones del movimiento de los trenes desde el momento en que alcanzan la distancia de visibilidad de la primera señal que anuncia una posible parada en el posible apartadero hasta que se produce dicha parada.

3.5.1. Ecuación general del movimiento del tren

Para esta aplicación partimos de la ecuación fundamental de la cinemática.

$$a(t) = \frac{dv}{dt}$$

en la que:

$a(t)$ = aceleración instantánea del tren, función del tiempo en general.

$\frac{dv}{dt}$ = derivada de la velocidad respecto al tiempo.

Antes de proceder a la integración de esta ecuación fundamental, conviene efectuar un somero análisis sobre la forma de la función $a(t)$, a considerar en el resto de este desarrollo, con el fin de que la descripción del movimiento obtenida sea, dentro de la precisión buscada, la más similar a la realidad.

Para ello, tomaremos como base las curvas velocidad/tiempo que se suelen presentar en la realidad, cuya forma es del tipo de la indicada en la figura 4, es decir, con apariencia «parabólica».

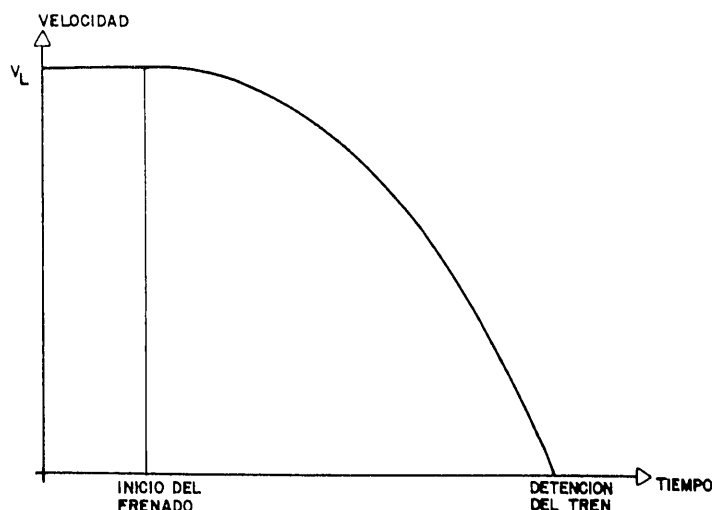


Fig. 4.—Forma típica de las curvas de velocidad/tiempo en la fase de frenado de un tren.

ca»; por ello, tomaremos para $a(t)$ una función lineal, de la forma:

$$a(t) = a_0 + At,$$

en la que a_0 y A son constantes que en la realidad dependerán de las características de los sistemas de freno de los trenes, pero que en los cálculos teóricos que efectuaremos a continuación podrán ser determinadas a partir de las condiciones de contorno impuestas al problema.

En estas condiciones, la ecuación fundamental del movimiento queda de la siguiente forma:

$$a_0 + At = \frac{dv}{dt}$$

puesto que

$$v(t) = \frac{ds}{dt}$$

siendo:

$v(t)$ = velocidad instantánea del tren, función del tiempo.

$\frac{ds}{dt}$ = derivada del espacio respecto al tiempo.

Se verifica.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} = a_0 + At$$

Integrando ahora esta ecuación dos veces respecto al tiempo, se obtiene:

$$v(t) = a_0 + \frac{1}{2} At^2 + B$$

$$v(t) = \frac{1}{2} a_0 t^2 + \frac{1}{6} At^3 + Bt + C$$

expresiones en las que B y C son constantes de integración a determinar a partir de las condiciones de contorno del problema.

3.5.2. Determinación de las constantes arbitrarias

La determinación de las constantes se efectúa a partir de las condiciones impuestas al movimiento en las diversas fases del mismo; sin embargo, la constante a_0 cabe determinarla de forma general a partir de la consideración de que la aplicación de los frenos resulta, en principio, gradual a partir de cero; es decir: que la expresión de la aceleración toma el valor cero en

el origen de tiempos de cada fase del movimiento, con lo que:

$$a(0) = 0 = a_0 + A \cdot 0,$$

luego $a_0 = 0$, con lo que las ecuaciones del movimiento a considerar en adelante han quedado de la forma:

$$a(t) = At$$

$$v(t) = \frac{1}{2} At^2 + B$$

$$s(t) = \frac{1}{6} At^3 + Bt + C$$

Respecto a las fases del movimiento a considerar, las describiremos a continuación.

El caso más complejo se produce cuando existe un bloqueo de cuatro indicaciones, en cuyo caso el proceso que define el movimiento del tren es el siguiente (fig. 5):

a) Desde una distancia l_{sl} de la señal que presenta la indicación de anuncio de precaución el tren debe actuar de una de las dos formas siguientes:

1. Si su velocidad es superior a 60 km/h.:

$$V_L > 60 \text{ km/h.}$$

Reducir la velocidad desde V_L a 60 km/h. en el instante de rebasar la señal.

2. Si su velocidad es igual o inferior a 60 km/h.:

$$V_L \leq 60 \text{ km/h.}$$

Ninguna actuación.

b) Desde una distancia l_p de la señal que presenta la indicación de anuncio de parada, el tren debe actuar de una de las dos formas siguientes:

1. Si su velocidad es superior a 30 km/h.:

$$V_L > 30 \text{ km/h.}$$

Reducir la velocidad desde V_L a 30 km/h. en el instante de rebasar la señal.

2. Si su velocidad es igual o inferior a 30 km/h.

$$V_L \leq 30 \text{ km/h.}$$

Ninguna actuación.

UN METODO DE CALCULO PARA CONTROL DE CIRCULACION EN UNA LINEA FERREA

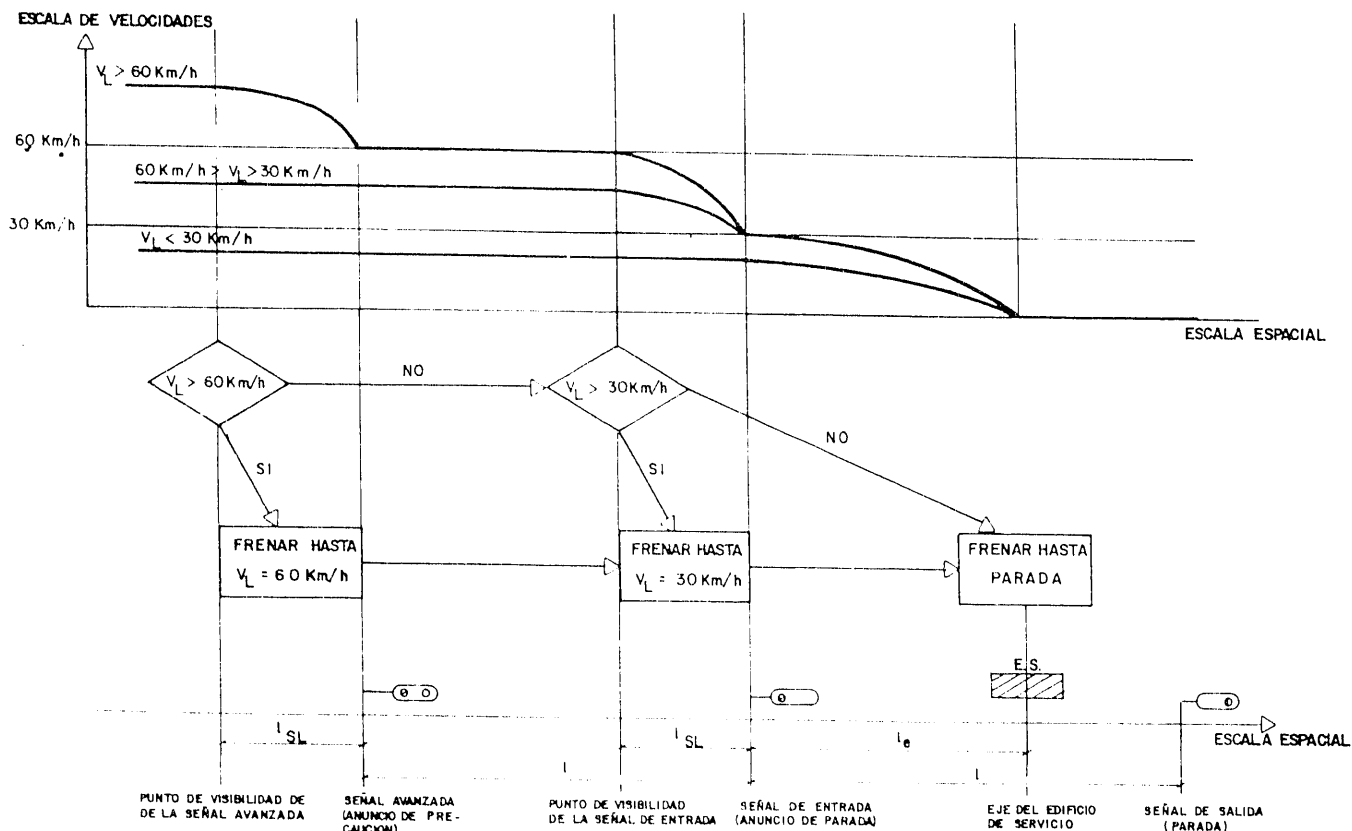


Fig. 5.—Esquema general del proceso que gobierna las fases del movimiento durante el apartado de un tren.

c) Desde el momento de rebasar la señal que presenta la indicación de anuncio de parada, el tren debe reducir su velocidad hasta la parada total a una distancia l_0 de dicha señal, quedando lógicamente entre piquetes de la vía de apartado correspondiente.

3.5.2.1. Determinación de las constantes en la fase a). En el instante inicial, los valores de las diversas variables son los siguientes:

$$\begin{aligned} t &= 0, \\ a(0) &= 0, \\ v(0) &= V_L, \\ s(0) &= 0, \end{aligned}$$

lo que permite deducir:

$$B = V_L \quad ; \quad C = 0,$$

con lo que:

$$\begin{aligned} a(t) &= At, \\ v(t) &= \frac{1}{2} At^2 + V_L, \\ s(t) &= \frac{1}{6} At^3 + V_L t. \end{aligned}$$

si $V_L > 60 \text{ km/h.}$, se debe tener para $s(t_1) = l_{SL}$:

$$v(t_1) = 60 \text{ km/h.},$$

con lo que:

$$\begin{aligned} 60 &= \frac{1}{2} At_1^2 + V_L, \\ l_{SL} &= \frac{1}{6} At_1^3 + V_L t_1; \end{aligned}$$

eliminando A entre ambas expresiones, se obtiene:

$$\frac{60 + 2V_L}{3} t_1 = l_{SL}$$

3.5.2.2. Determinación de las constantes en la fase b). En el instante inicial los valores de las distintas variables son los siguientes:

$$\begin{aligned} t &= 0, \\ a(0) &= 0, \\ v(0) &= V'_L, \\ s(0) &= 0, \end{aligned}$$

siendo V'_L la velocidad del tren al principio de la fase b), cuyo valor será 60 km/h. , si V_L [fase a)]

era igual o mayor de 60 km/h., o V_L si V_L [fase a)]
era menor de 60 km/h.,

$$B = V_L' ; \quad C = 0;$$

con lo que:

$$a(t) = At$$

$$v(t) = \frac{1}{2} At^2 + V_L'$$

$$s(t) = \frac{1}{6} At^3 + V_L' t$$

si $V_L' > 30$ km/h., se debe tener para $s(t_2) = l_{SL}$:

$$v(t_2) = 30 \text{ km/h.}$$

con lo que:

$$30 = \frac{1}{2} At_2^2 + V_L'$$

$$l_{SL} = \frac{1}{6} At_2^3 + V_L' t_2$$

eliminando A entre ambas expresiones se obtiene:

$$\frac{30 + 2V_L'}{3} t_2 = l_{SL}$$

3.5.2.3. Determinación de las constantes en la fase c). En el instante inicial, los valores de las diversas variables son los siguientes:

$$t = 0,$$

$$a(0) = 0,$$

$$v(0) = V_L'',$$

$$s(0) = 0,$$

siendo V_L'' la velocidad del tren al principio de la fase c), cuyo valor será 30 km/h., si V_L' [fase b)] era igual o mayor de 30 km/h., o V_L' si V_L' [fase b)] era menor de 30 km/h.; lo que permite deducir:

$$B = V_L'' ; \quad C = 0;$$

con lo que:

$$a(t) = At$$

$$v(t) = \frac{1}{2} At^2 + V_L''$$

$$s(t) = \frac{1}{6} At^3 + V_L'' t$$

en todo caso, cuando el tren se detiene en la vía de apartado del apartadero A + 1, se debe de tener para $s(t_3) = l_0$:

$$v(t_3) = 0$$

con lo que:

$$0 = \frac{1}{2} At_3^2 + V_L''$$

$$l_0 = \frac{1}{6} At_3^3 + V_L'' t_3$$

eliminando A entre ambas expresiones se obtiene:

$$\frac{2V_L''}{3} t_3 = l_0$$

3.5.3. Determinación de los tiempos de apartado

El valor del tiempo de apartado (t_m) que buscamos será la suma de los tiempos empleados por el tren para recorrer la distancia total desde que se produce el avistamiento de la primera señal que anuncia una posible parada en el próximo apartadero hasta que se produce la parada del tren en la vía de apartado del apartadero A + 1.

Este tiempo es la suma de los t_1 , t_2 y t_3 (puntos 3.5.2.1 a 3.5.2.3) en régimen general de frenada, a los que hay que añadir otros tiempos a velocidad constante que podemos denominar de transición y que se emplean en recorrer las distancias existentes entre las señales asociadas a la fase a) y b) y el avistamiento de las señales asociadas a las fases b) y c) respectivamente.

De una forma explícita, basándonos en la figura 5 ya citada y en los puntos 3.5.2.1 a 3.5.2.3, los valores de los tiempos t_1 a t_5 son los siguientes:

$$t_1 = \frac{3l_{SL}}{60 + 2V_L} \text{ (h)} \quad \text{si } V_L > 60 \text{ km/h.}$$

$$\text{si } V_L < 60 \text{ km/h., evidentemente: } t_1 = \frac{l_{SL}}{V_L} \text{ (h)}$$

$$t_2 = \frac{3l_{SL}}{30 + 2V_L'} \text{ (h)} \quad \text{si } V_L' > 30 \text{ km/h.}$$

$$\text{si } V_L' < 30 \text{ km/h., evidentemente: } t_2 = \frac{l_{SL}}{V_L'} \text{ (h)}$$

$$t_3 = \frac{3l_0}{2V_L''} \text{ (h)}$$

puesto que $V_L'' < 30$ km/h. en cualquier caso.

$$t_4 = \frac{l - l_{SL}}{60} \text{ (h)} \quad \text{si } V_L > 60 \text{ km/h.}$$

UN METODO DE CALCULO PARA CONTROL DE CIRCULACION EN UNA LINEA FERREA

pero si $V_L \ll 60$ km/h., resulta:

$$t_4 = \frac{l - l_{SL}}{V_L} (h)$$

Análogamente:

$$t_5 = \frac{l - l_{SL}}{30} (h) \quad \text{si } V_L' > 30 \text{ km/h.}$$

y

$$t_5 = \frac{l - l_{SL}}{V_L} (h) \quad \text{si } V_L' \ll 30 \text{ km/h.}$$

Finalmente, de acuerdo con lo indicado al principio de este punto, podemos afirmar que:

$$0 = \frac{1}{2} A t_3^2 + V_L''$$

$$l_0 = \frac{1}{6} A t_3^3 + V_L'' t_3$$

eliminando A entre ambas expresiones, se obtiene:

$$\frac{2V_L''}{3} t_3 = l_0$$

Las expresiones aritméticas del movimiento del tren en las hipótesis descritas proporcionan, para cada uno de los tres casos posibles de V_L , los resultados siguientes:

1. $V_L > 60$ km/h.:

$$t_m = \frac{780 + 7V_L}{180(V_L + 60)} \cdot l_{SL} + \frac{l_0}{30} + \frac{l}{60}$$

2. $30 < V_L \ll 60$ km/h.:

$$t_m = \frac{90 + 7V_L}{30(V_L + 30)} \cdot l_{SL} + \frac{l_0}{30} + \frac{l}{V_L}$$

3. $V_L \ll 30$ km/h.:

$$t_m = \frac{l_0 + 2l_{SL}}{V_L} + \frac{l}{V_L}$$

expresiones en las que los valores de todos los parámetros ya han sido definidos en el apartado 3.4, excepto el que corresponde a la distancia entre la señal de entrada y el eje del edificio de servicio de un apartadero (l_0), cuyo valor se puede tomar 1.000 m.

4. METODOLOGIA DE TRABAJO

Una vez expuestas las bases teóricas resulta posible, apoyándonos en las expresiones deducidas en el apartado 3, pasar a exponer el método a seguir para el cálculo práctico de los parámetros de definición de la instalación a proyectar.

El proceso a seguir se desarrolla en las siguientes etapas:

1. Definición del tráfico para el que se dimensiona la instalación.

2. Establecimiento de una hipótesis de explotación de trabajo.

3. Definición de los paquetes de trenes característicos de la explotación elegida.

4. Cálculo de los parámetros para cada paquete de trenes y elección de los más adecuados.

5. Análisis de fases de implantación para tráficos de horizontes anteriores al elegido para efectuar el dimensionamiento.

A continuación, en los subapartados siguientes, se desarrollan las etapas de trabajo descritas.

4.1. Definición del tráfico de proyecto

Se parte de las previsiones de tráfico efectuadas por los servicios competentes, que deberán recoger básicamente el número de trenes de viajeros, la categoría de los mismos y los intervalos horarios en los que deben circular; el volumen de mercancías a transportar, con desglose de los tipos de tráfico, al menos en contenedores, paquetería y vagón completo.

A partir de estos datos, y de acuerdo con los valores disponibles sobre cargas y composiciones de trenes, tanto de viajeros como de mercancías, se puede definir el número de trenes necesarios para la realización de los tráficos previstos, teniendo en cuenta, asimismo, las pendientes máximas de la línea.

Con dichos datos, y en función de las previsiones de los medios de tracción y del perfil de la línea, se asignará a cada tipo de tren una ve-

TABLA I

Ejemplo de previsión de número de trenes y tipos de velocidad de proyecto

Velocidad	Número de trenes	Tipo de tráfico
120	12	Viajeros
90	20	
65	6	
75	2	Mercancías
60	8	
50	48	
Total	96	

locidad, lo que permitirá establecer un listado en el que figure el número de trenes de cada tipo de velocidad, separados además en dos grandes grupos: viajeros y mercancías (tabla I).

Sobre estos números de trenes de cada tipo de velocidad se aplicará un coeficiente de mayoración para garantizar que la capacidad de la línea proyectada presentará la holgura necesaria para asegurar la regularidad de la circulación. El valor de este coeficiente se debe situar alrededor de 1,67, lo que asegura, en las hipótesis de proyecto, un grado de utilización de la línea del 60 por 100, de acuerdo con las recomendaciones de la UIC en este sentido.

A partir de este momento, los números de trenes de cada tipo de velocidad considerados en los cálculos del proyecto son los obtenidos de la mayoración de los datos iniciales.

4.2. Hipótesis de explotación

El siguiente paso, basado en los datos previos y en el tráfico definido en el punto 4.1, es el establecimiento de una hipótesis de explotación que debe ser lo suficientemente flexible como para admitir las variaciones que sin duda deberán existir en el caso de la explotación real respecto a la hipótesis efectuada.

La base fundamental para el establecimiento de esta hipótesis de explotación es el reparto de los trenes de viajeros en los intervalos horarios definidos por los servicios comerciales, consi-

HORAS	VELOCIDAD					
	120	90	65	75	60	50
0						
1						
2						
3						
4						
5				S	S	S
6						
7		S				
8	S					
9		S	S			
10	C o n s e r v a c i ó n					
11						
12						
13						
14		S				
15	S					
16		S				
17						
18				S	S	S
19		S				
20	S					
21		S				
22						
23						
0						

Fig. 6.—Ejemplo de reparto horario de trenes de viajeros. S = servicio. Las horas tienen únicamente un valor indicativo con el fin de detectar las posibles concentraciones de circulaciones.

derándose uniformemente repartidos en cada intervalo los trenes asignados al mismo (figura 6, tabla II). Con estos datos se establece un gráfico sintético como el de la figura 7, dibujado a partir de los datos siguientes:

- Número de trenes de viajeros de cada tipo de velocidad.
- Intervalo medio entre trenes de viajeros de cada tipo de velocidad.
- Número total de trenes de mercancías.
- Intervalo medio entre trenes, considerando su número total.

La técnica para establecer este gráfico consiste únicamente en marcar los trenes de viaje-

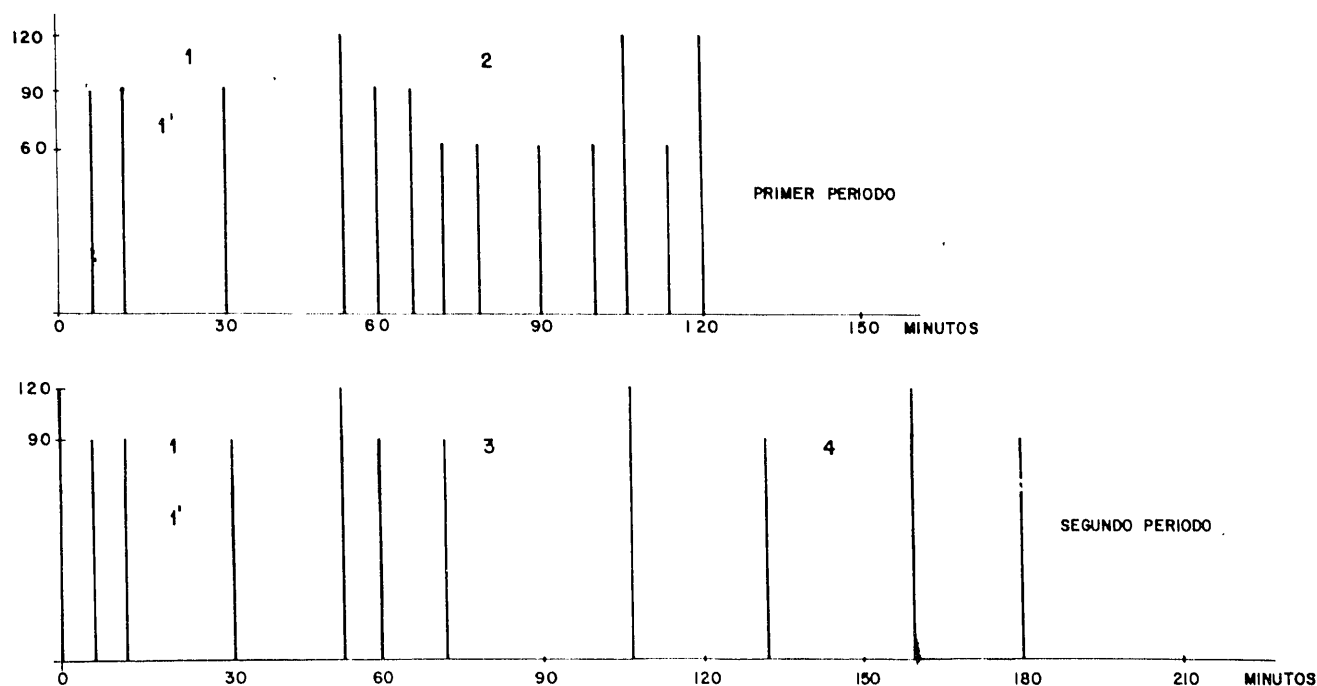


Fig. 7.—Gráfico sintético de trenes de viajeros.

TABLA II

Ejemplo de intervalos entre trenes de viajeros que, en principio, deben ser respetados

Velocidad	Número de trenes por sentido	Período total de circulación (horas)	Intervalo	
			Horas	Minutos
120	19	8	0,44	26,67
90	24	3	0,27	16,36
		8	0,73	43,64
65	4	1	0,33	20,00

ros distanciados los intervalos necesarios y rellenar los huecos que queden con el máximo número posible de trenes de mercancías, debiéndose comprobar que a lo largo del período considerado el número total de trenes de cada tipo de velocidad situados corresponde con el previsto.

4.3. Paquetes de trenes característicos

A partir del gráfico sintético de la hipótesis de explotación establecido en el subapartado 4.2, resulta posible definir una serie de paquete-

tes de trenes característicos limitados por dos trenes de la velocidad máxima contemplada, resultando caracterizado a su vez, cada paquete, por las sucesiones de trenes presentes en el mismo, estableciéndose una matriz cuyas filas representan los coeficientes, para cada paquete característico, de los tiempos de sucesión que lo componen y cada una de cuyas columnas corresponde a un paquete característico; es decir:

Tiempos de sucesión	Paquetes característicos				
	1	2	 i	 p	
$t(V_1)$	1	1	 1	 1	
$t(V_1/V_1)$	0	-1	 1	 0	
$t(V_1/V_2)$	-1	0	 0	 0	
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
$t(V_i/V_i)$	0	0	 1	 -1	
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
$t(V_n/V_n)$	-1	0	 1	 -1	

donde $t(V_1)$ se ha obtenido por cociente entre el total de horas con servicio de trenes de velocidad V_1 y el número de trenes de velocidad V_1 , menos uno.

4.4. Cálculo de parámetros

A partir de los datos contenidos en la matriz de definición de los paquetes de trenes característicos, resulta ahora posible el cálculo del valor d (distancia entre apartaderos contiguos), o bien del valor l (distancia entre señales), o incluso del número n de trenes iguales que pueden situarse en el gráfico entre otros dos trenes iguales, si se suponen conocidos los valores de d y l .

De una forma general, y puesto que se trata de dimensionar la instalación para un tráfico dado, se partirá del valor de l más pequeño posible, es decir, 1.500 m., determinándose el valor de d que correspondería para cada uno de los paquetes característicos de trenes, y tomando finalmente como valor de d el menor de los obtenidos (tabla III).

Análogamente, se puede hacer partiendo de un cierto valor de d y tomando para l el menor valor obtenido, si bien, caso de obtener algún valor de l inferior a 1.500 m., deben revisarse las hipótesis de explotación o el valor de d elegidos.

TABLA III

Ejemplo de análisis de paquetes característicos

Paquete	Ecuación en d	n .	v .	d .
1	—	3	90	78,72
2	—	2	90	94,32
3	$26,27 - t(120/90) - t(90/65) - t(65/120)$	—	—	38,36
4	$26,27 - t(120/65) - t(65/90) - t(90/65) - t(65/120)$	—	—	21,58
5	$26,27 - t(120/90) - t(90/120)$	—	—	107,76
6	—	5	75	21,70

4.5. Análisis de fases intermedias

Teniendo en cuenta que, en general, el tráfico para el que se dimensiona la instalación no se alcanzará hasta después de transcurrido un

período de tiempo largo, no resulta conveniente efectuar una inversión de acuerdo con un horizonte a largo plazo, puesto que quedaría parcialmente desaprovechada. Por ello, a la vista del tráfico previsto a medio o, incluso, a corto plazo, depende de la dinámica de crecimiento del número de circulaciones previstas; se debe realizar un cálculo adicional que permita escalonar las inversiones, bien manteniendo la separación entre señales e instalando únicamente una de cada dos o bien construyendo y poniendo en servicio todos los apartaderos e instalando las señales a distancias mayores de 1.500 m., con lo que la capacidad de la línea quede adaptada a las necesidades de los horizontes intermedios considerados.

Para el desarrollo de estos cálculos se debe, en principio, seguir el proceso descrito en los subapartados 4.1 a 4.4 anteriores.

Manuel José Megía Puente.



Ingeniero de Caminos. Promoción 1973 de la Escuela de Madrid. Especialidad: Transportes, Puertos y Urbanismo.

Desarrolla su actividad profesional en RENFE desde 1973 en puntos relacionados con la vía y la infraestructura a través de su integración sucesivamente en: Dirección de Innovación, Gabinete de Investigación, Gabinete de Investigación y Desarrollo, Dirección de Obras e Instalaciones, Dirección

de Transportes e Instituto Tecnológico Ferroviario.

Ha intervenido como ponente en cursos, simposios y jornadas técnicas relacionadas con la vía férrea y sus componentes, y es coautor de tres obras sobre aspectos técnicos de la vía e infraestructura y la explotación ferroviarias.

Galardonado con el premio José María García Lomas, otorgado por RENFE por primera vez en 1982, por un trabajo metodológico sobre planificación de estaciones y terminales ferroviarios.