NUEVO MÉTODO

PARA EL CÁLCULO DE LOS LARGOS VIRTUALES DE LOS TRAZADOS DE LOS ANTE PROYECTOS DE LAS LÍNEAS FÉRREAS

(Método Santa María)

Si tomamos la ecuacion jeneral de la *potencia* que necesita una locomotora para arrastrar un tren dado con velocidad dada; o sea

$$(1) \qquad \frac{F\ V}{3.6 \times 75} = HP \text{ en caballos vapor.}$$

en la cual *F* es el esfuerzo de traccion i *V* la velocidad en kilómetros por hora, podemos determinar los largos virtuales por medio de esta fórmula, por ser la potencia HP *constante para una misma locomotora.*

Como los largos virtuales, *son proporcionales al peso que puede arrastrar una misma locomotora con la misma velocidad en las diferentes secciones de un trazado*: i como los pesos de los trenes arrastrados dependen de las resistencias, las que con el *máximum de aprovechamiento de la potencia*, deben ser iguales al esfuerzo *F* que desarrolla la locomotora en el collar del ténder, tenemos: que si en la fórmula anterior, HP i *V* son constantes, i tomamos para *V* la velocidad mínima que permita aprovechar toda la adherencia de la locomotora; el esfuerzo *F* pasa a ser directamente proporcional a las resistencias de la via, i miéntras mayores sean estas resistencias menor será el tonelaje que la locomotora pueda arrastrar.

Bastará entónces, espresar el esfuerzo *F* en funcion del peso del tren i de la locomotora, para tener una relacion entre las pendientes, i demas resistencias de un trazado (curvas, etc.) reducidas a pendientes equivalentes, i los pesos de los trenes remolcados.

Si llamamos: V_m las resistencias propias del motor: *B* el coeficiente global de las resistencias del tren, *P* el peso de la locomotora, i *Q* el peso del tren remolcado,

Tendremos:

$$F = V_m\ P + (B + i)\ (P + Q) \qquad (2)$$

Si introducimos este valor de F, en la relacion (1) resulta:

$$\frac{V_m\ P+(B+i)\ (P+Q)\ V}{270}=HP \qquad (3)$$

Para determinar la velocidad constante V que debemos introducir en la fórmula, para que no sea arbitraria i dé realmente la relacion de las resistencias de los diferentes trozos de una via, tenemos que fijar *la que permite aprovechar el máximum del esfuerzo F*. Sin eso, no podrian ser comparables los pesos de los trenes remolcados en las diversas secciones de un trazado; los pesos de los trenes estarian influenciados por *la velocidad*, puesto que la locomotora no marcharia aprovechando todo su esfuerzo F de traccion.

De la ecuacion (1) se deduce:

$$F\ V=270\ HP \qquad V=\frac{270\ HP.}{F}=\text{en kilómetros por hora} \qquad (4)$$

La relacion (4) nos da la velocidad que aprovecha el máximum del esfuerzo F. Pero *el máximum del esfuerzo F*, para una locomotora dada, *no puede ser mayor que su adherencia;* luego si consideramos, por ejemplo, una máquina de 40 toneladas, sin ténder, i con tres ejes acoplados i un par de ruedas delanteras cargadas con un $\frac{1}{8}$ P. tendremos, como peso adherente $(P-\frac{1}{8}\ P.)$ para nuestro caso

$$40-\tfrac{1}{8}\times 40=35 \text{ toneladas}$$

i como el coeficiente de adherencia se toma entre nosotros, en un séptimo como término medio, tendremos:

$$A=\tfrac{1}{7}\times 35.000=5.000 \text{ kilos.}$$

Para determinar la constante del potencial HP de una locomotora dada, en funcion de su peso total, si no es dada directamente por el conocimiento de la locomotora, podemos fijarla teniendo presente que en las locomotoras modernas se pueden tomar 90 a 100 kilos de peso por caballo vapor de su potencial; por consiguiente, si consideramos como hemos dicho una locomotora de 40 toneladas, para fijar su velocidad que da el *máximum* de su rendimiento, fijaremos el potencial de la locomotora por la relacion

$$\frac{40.000}{95}=421 \text{ caballos vapor}$$

Como F máximum es igual a la adherencia A; introduciendo estos valores en la ecuacion (4) tenemos:

$$V=\frac{270\times 421}{5.000}=22{,}734 \text{ kilómetros por hora}-$$

Conociendo la velocidad mas conveniente, determinaremos las resistencias como sigue:

$$V_m\ P+(B+i)(P+Q)=\frac{270\ HP}{V}=11{,}8764\ HP. \qquad (6)$$

Para determinar V_m de una locomotora conocida, teniendo la velocidad de su marcha, usaremos la fórmula del Estado Aleman, i tendremos:

$$V_m=4\sqrt{X+0.002\ V^2}$$

Para V=22,734 kilómetros por hora i locomotora de 3 ejes acoplados, tenemos:

$$V_m=4\sqrt{3+0{,}002\times 22{,}734^2}=7{,}96 \text{ kilos}$$

por tonelada de locomotora.

Conocidas las resistencias de la locomotora, se podria aproximar nuevamente el valor de su potencial, tomando el esfuerzo disponible en el collar del ténder; i poniendo en relacion este potencial con el peso adherente de la locomotora, con las cifras de 80 a 90 kilos por caballo vapor; o sea con el promedio de 85 kilos: luego aproximando tendríamos:

$$HP=\frac{(P-\frac{1}{8}P)\times 1.000-V_m\ P}{85}$$

puesto que el esfuerzo F_m no puede en ningun caso ser mayor que la adherencia $(P-\frac{1}{8}P.)$ Con la locomotora que hemos tomado de ejemplo, tenemos:

$$HP=\frac{(40-\frac{1}{8}\times 40)\times 1.000-7{,}96\times 40}{85}=408{,}018\ HP.$$

Se ve por lo anterior, que el potencial aproximado que se calculó para fijar la velocidad mas conveniente, no difiere en mas de 13 caballos vapor; i que si calculamos nuevamente, con el potencial rectificado la mejor velocidad, tendremos:

$$V=\frac{270\times 408.018}{5.000}=22{,}0329 \text{ kilómetros por hora}$$

por consiguiente el valor de las resistencias calculadas para la locomotora no cambia de una manera apreciable.

Si los datos anteriores, los introducimos en la ecuacion (6) tenemos:

$$7{,}96\times 40+(4+i)\ (40+Q)=11{,}8764\times 408{,}018 \qquad (7)$$

tomando 4 kilos como resistencia media al rodado en línea recta, para el equipo corriente; i comprendiendo en esta cifra, el promedio de las resistencias de las curvas del trazado, cuando los radios son mayores de 300 metros.

Así la ecuacion (7) queda solo en funcion de las pendientes i i del peso Q del tren remolcado por una misma locomotora i con la misma velocidad correspondiente al máximum de su rendimiento.

Las ecuaciones anteriores han puesto en evidencia, las resistencias del motor, como lo vimos, haciendo uso de las fórmulas del Estado Aleman, fórmulas que varian con la trocha de la via i con el tipo de locomotora: están en evidencia las resistencias medias B globales debidas al equipo que se desea usar para la línea que se proyecta, i la de sus curvas, que traducidas a pendientes o se suman con las jenerales de la línea, o con las correspondientes a las pendientes de cada trozo.

Luego para cada caso, despues de fijar el tipo de locomotora mas adecuado para su esplotacion, el tipo de equipo mas en relacion con la cantidad i calidad del tráfico que se presume para una línea, se determinan las resistencias de los trenes haciendo las operaciones con las cifras que realmente dan las verdaderas condiciones de la esplotacion de la línea, i en funcion tambien de su trocha.

Sigamos con el ejemplo anterior, para trocha normal i trazados corrientes. Desarrollando la ecuacion (7) tenemos:

$$Q = \frac{4367,385 - 40 \cdot i}{4 + i}$$

relacion como se ve que da el peso del tren remolcado en funcion de las pendientes de la via, i por lo tanto la relacion de los largos virtuales de los diferentes trozos.

Tabulando la ecuacion anterior, se tiene la serie de valores de Q apropiados para cada caso. Antes, pues, de ir al estudio del trazado, como por los reconocimientos preliminares i las especificaciones que se dan, se tienen los elementos para introducir en las fórmulas los coeficientes adecuados para las líneas que se estudian, formaremos un cuadro de los valores de Q, el cual nos dará, en cada trozo, segun sus pendientes, las relaciones de sus largos virtuales, en conformidad con el sistema de esplotacion que se proyecta para los servicios de las mismas líneas.

Estos mismos cálculos, ponen en evidencia, que mejorando el motor con que se hace una esplotacion, las influencias nocivas de las pendientes se hacen ménos sensibles; i por lo tanto si los coeficientes virtuales reflejan el kilometraje horizontal que ocasiona los mismos gastos, éstas deben ser menores miéntras mas perfeccionado sea el equipo con que se esplota una línea.

Todas estas circunstancias, se encuentran consideradas en la fórmula anterior; así, por ejemplo, si tenemos que contemplar el caso de las líneas de montañas, tendremos una esplotacion con locomotoras con el *máximum* de adherencia, o sea con $P = P'$, en que todo el peso motor es adherente, i como relacion entre el peso i la potencia 85 kilos por caballo de vapor.

Si la locomotora es perfectamente proporcionada con los elementos de la via, su peso con relacion a la adherencia será un *mínimum* i tendremos 80 kilos por caballo vapor.

De modo que, conociendo bien los elementos con que se proyectan las esplotaciones de las líneas que se estudian, se determinan con relacion a estos elementos i los de la via i condiciones jenerales del trazado (curvas, etc.) los factores V_m, i, B V mínima, etc., i se forma con ellas el cuadro donde se encuentran tabulados los recargos correspondientes a cada pendiente, con esa tabla se hacen ya con suma facilidad las comparaciones de los diversos derroteros del ante-proyecto que se estudia.

Si consideramos por ejemplo, una línea de circunvalacion, como la del Ferrocarril de cintura de Paris, cuyo perfil tiene pendientes de 10, 15 i 20 m/m por metro, i curvas de 150 m de radio, esplotada con locomotoras ténders de tres ejes acoplados i bogie delantero, con una carga de 16,5 toneladas por eje, pesando vacías 51,5 toneladas i 63.185 kg. listas para el servicio, o sea con un peso útil adherente, en el caso mas desfavorable de 47.185 kg. i con 800 HP. como potencia; i siendo máquina ténder, con una proporcion de 78 kilos de peso bruto por caballo vapor o de 65 kilos para la máquina vacía; tendremos, que la mayor parte de los datos que calculamos en el ejemplo anterior, se encuentran enteramentes fijos por el sistema de esplotacion adoptado: así tenemos: $P = 63.185$, $P' = 13.685$, o sea en funcion del peso de la locomotora $P' = \frac{1}{4{,}617}\,P$ como relacion entre el peso total P i el bogie delantero: i de estos datos se deduce:

Peso adherente $16{,}5 \times 3 =$	49.50	Tons.
Bogie delantero...............................	13.685	»
TOTAL.....................	63.185	Tons.

Como para estimar el peso *útil adherente*, no se puede considerar la locomotora con toda su carga de agua, etc.: en el caso anterior, tenemos como peso *útil adherente 47,185 toneladas.*

Como la adherencia en las líneas de circunvalacion, como en las de Paris, es mala, por los muchos túneles donde los rieles están mas o ménos grasosos, se estima solamente en $\frac{1}{8}$ del peso útil adherente; o bien en 1/8.5 *del peso total adherente*: así tenemos:

$$47{,}185 \times \tfrac{1}{8} = 5.898 \text{ kilos}$$
$$49{,}500 \times 1/8.5 = 5.823{,}5 \text{ kilos}$$

como se ve dando cifras casi iguales.

Con los datos anteriores se puede determinar la velocidad mas conveniente de esta locomotora, es decir la que permite utilizar el máximum de su esfuerzo de traccion, que es cuando $F = A = 5.823{,}5$ kilos, i tendremos:

$$\frac{F\,V}{270} = 800 \text{ HP.}$$

o sea:

$$\frac{5.823,5 \times V}{270} = 800$$

de donde:

$$V = 21,56 \text{ kilómetros por hora.}$$

Las resistencias propias de esta locomotora, para la velocidad de 21,56 kilómetros serán:

$$V_m = 4\sqrt{3 + 0.002 \times 21,56^2} = 7,86 \text{ kilos por toneladas.}$$

Por consiguiente, la ecuacion jeneral queda:

$$V_m\ P + (B + i)\ (P + Q) = \frac{270 \times 800}{21,56} = 10.018,50$$

$$7,86 \times 63.185 + (5.228 + i)\ (63.185 + Q) = 10.018,50$$

$$Q = \frac{9.091,535 - 63.185 \times i}{5.228 + i}$$

ecuacion que da para este caso las relaciones de los pesos de los trenes arrastrados por la misma locomotora i por consiguiente los largos virtuales de los diferentes trozos.

En el caso anterior, la determinacion del coeficiente global B de las resistencias independientes de las gradientes, se ha hecho de la manera siguiente:

Desde luego tenemos como material el de 8 ruedas con bogies i dada por la fórmula $R = 1,65 + 0,05\ V$, para lubrificacion de aceite i velocidades menores de 32 kilómetros por hora; i para las curvas la relacion $\frac{500\ e}{R}$ luego; para el caso que tratamos:

$$R = 1,65 + 0,05 \times 21,56 = 2,728 \text{ kilos por toneladas.}$$

$$\frac{500 \times 1,05}{150} = 5 \text{ kilos por tonelada.} -$$

Como no todas las curvas del metropolitano tienen 150 m de radio, siendo el radio medio de 300 m, tomaremos como resistencia media de las curvas

$$\frac{500 \times 1,5}{300} = 2,5 \text{ kilos por toneladas}$$

por consiguiente:

$$B = 2.728 + 2,5 = 5.228 \text{ kilos.}$$

La tabla que damos a continuacion se refiere como se vé, a una línea normal, de via de 1,68 m i con curvas de radio medio de 200 metros, puesto que se toma para B o sea como valor de las resistencias globales jenerales 4 kilos por tonelada de tren; i tomamos una locomotora de 40 toneladas con tres ejes acoplados i un eje delantero.

i en mm.	Q en toneladas	$\frac{Q}{P}$	Coeficiente virtual	$Q=\frac{4367.385-40\,i}{4+i}$ $P=40$ ton.
0	1,091.846	27.296	1.000	Al tomarse el peso Q del tren arrastrado hai que considerar el ténder como vehículo, por cuanto se toma por base el peso P propio de la locomotora.
1	865.477	21.637	1.261	
2	714 564	17.864	1.527	
3	606 769	15.169	1.799	
4	525.923	13.148	2.076	
5	463.042	11.576	2.358	
6	412.738	10 318	2.645	
7	371.580	9 289	2.938	
8	337.282	8 432	3.236	
9	308.260	7.706	3.599	
10	283.384	7 095	3.851	
11	261.825	6.545	4.169	
12	248.964	6 074	4.491	Tabla adecuada para trocha ancha de 1.68 con radios medios de 200 m.
13	226.316	5.057	4.823	
14	211.521	5 288	5.161	
15	198.283	4 957	5.506	
16	186.359	4.659	5.858	
17	175.589	4.389	6.218	
18	165.790	4.144	6.585	
19	156.842	3.928	6.961	
20	148 641	3.716	7.345	
21	141.095	3.527	7.734	
22	134.130	3.353	8.140	
23	127.680	3.192	8.551	
24	121.692	3.042	8.972	
25	116.116	2.903	9.383	
26	110 909	2.772	9.844	
27	106.044	2.651	10.296	
28	101 480	2.537	10.759	
29	97.193	2.429	11.124	
30	93.158	2.328	11.720	
31	89.358	2.234	12.218	
32	85.760	2.144	12.731	
33	82.361	2.052	13.257	
34	79.141	1.976	13.796	
35	76.086	1.900	14.350	

Pesando la locomotora sola 40 toneladas i su ténder 18 toneladas, o sea un tota. para el motor de 58 toneladas.

Con pendiente de 35 m/m por metro, solo puede arrastrar un peso de (76.986 −18 =58.086) 58.086 toneladas de tren; es decir un peso igual al peso del motor.

En estas condiciones la traccion por adherencia deja de ser económica.

Si consideramos el caso de las *pendientes*, en las fórmulas anteriores solo se cambia el signo del término en *i* i tendremos:

$$Q = \frac{4.367,385 + 40\,i}{4 - i}$$

para peso del tren remolcado.

Considerando el mismo ejemplo de las *gradientes*, tendremos que $Q = \infty$ cuando las resistencias del rodado, son iguales con la componente del peso paralelo a la via, o sea $i = 4$ para el caso que consideramos.

Las pendientes comprendidas entre 0 i 4 m/m por metro, demandarán ménos esfuerzo de rodado que los esfuerzos de traccion en horizontal; i por consiguiente, sus coeficientes virtuales serán menores que la unidad i tendremos:

para $i = 0$	$\frac{Q}{P}$	$= 21,785\%$	de recargo	.... =	1,000
» $\quad$ » = 1	»	= 36,725	»	.... =	0,593
» $\quad$ » = 2	»	= 55,587	»	.... =	0,391
» $\quad$ » = 3	»	= 112,175	»	.... =	0,194
» $\quad$ » = 4	»	= ∞	»	.... =	0,000

Pasada la pendiente de 4 m/m por metro, tienen que entrar los frenos en accion para contrarrestar el escedente de *aceleracion* que daria la pesantez, i tendremos $V_f = i - i'$, llamando *i' la pendiente límite que no exije frenos*, que en el ejemplo anterior es 4 m/m por metro.

La de 5 m/m por metro vendria dando un coeficiente virtual, debido a la resistencia de los frenos, correspondiente a (5 − 4 = 1 m/m) la gradiente de 1 m/m por metro i así sucesivamente.

D. V. SANTA MARÍA.