

ESTUDIO SOBRE LA APLICACION DE LA TRACCION ELÉCTRICA EN LA SEGUNDA SECCION DE LOS FERROCARRILES DEL ESTADO

POR

HORACIO VALES O., RAUL CLARO SOLAR
FRANCISCO HUNEUS G. I ALBERTO LIRA O.

(Continuacion) 30 July 473

2. *Tonelaje de los trenes.*—La determinacion del tonelaje de los trenes puede efectuarse en vista de los datos suministrados por las Memorias de la Empresa de los Ferrocarriles del Estado.

En ellas se encuentran: el kilometraje de la carga; el kilometraje de los pasajeros i luego el de su peso, siempre que se fije un peso medio para cada uno, 100 kilógramos, por ejemplo; el kilometraje de los carros i coches i luego el de su peso, estimados a razon de 10 toneladas los primeros i de 20 toneladas los segundos. Tomando un kilometraje proporcional para la carga de la Empresa, se puede avaluar con tales datos el kilometraje total del peso arrastrado por las locomotoras. Como las Memorias dan el kilometraje de las locomotoras, la division de aquella cifra por esta última nos daria el peso medio de arrastre por tren sin contar la locomotora.

Habríamos realizado el estudio estadístico a que nos referimos a pesar de que, como se verá mas adelante, no es él la base que hemos tomado para fijar el tonelaje medio de los trenes, pues en todo caso sus resultados nos habrian servido para comprobar nuestras conclusiones. Pero este trabajo ha sido ya realizado por la Comision inspectora de los Ferrocarriles del Estado, para los años 1895-1901: los cálculos de esta comision la han conducido a fijar el peso medio arrastrado por las locomotoras, para todos los servicios, en 140 toneladas.

Conviene observar que esta es solo una cifra media i que ella se refiere a toda la red central. Ambas observaciones manifiestan la necesidad de aumentarla cuando se trata de partir de ella para llegar a la fijacion de las potencias máximas consumidas: en efecto, la línea férrea de Santiago a Talca tiene un tráfico mas suave que muchas otras

secciones, de Santiago a Valparaiso por ejemplo, i esto la permite aceptar trenes mas pesados; por otra parte, es aquella una seccion de mucho mas tráfico que la de San Rosendo al Sur por ejemplo; por fin, el peso medio anual será evidentemente inferior al peso efectivo de un gran número de trenes, para compensar el menor peso de los trenes mas livianos.

Segun esto la cifra de 140 toneladas como peso de arrastre nos servirá solo como un valor mínimo de comparacion.

Si reaccordmos la observacion ya hecha acerca de que la capacidad máxima del servicio de traccion eléctrica debe ser equivalente a la capacidad máxima de que es susceptible el actual servicio, nos vemos conducidos a apreciar este último factor.

Conocida como es la tendencia de nuestros ferrocarriles a aprovechar el máximo del poder de arrastre de las locomotoras que mueven los trenes de carga i siendo ese máximo funcion de su peso adherente, el criterio racional por aplicar en la determinacion del peso de arrastre será calcular su valor máximo para las locomotoras en servicio i en vista del perfil i planta de la línea. En otros términos, estimamos que dicho peso se obtendrá determinando el peso máximo de tren que esas locomotoras pueden arrastrar sobre la rampa máxima a su velocidad de marcha efectiva.

En el cuadro adjunto relativo al material de traccion, vemos que la locomotora de carga de mayor peso adherente es la núm. 207. Tomando como tipo esta locomotora i calculando su poder máximo de arrastre en la rampa máxima, tendremos seguridad de llegar a una cifra que, sin pecar de exajerada, no seria baja en ningun caso; observamos para ello que, por regla jeneral, no hai remolque en esta seccion de la línea central.

La rampa máxima en cuestion se encuentra ántes de la estacion de Teno i alcanza a 0,0162. Para proceder en rigor deberíamos tener presente que hai trenes de carga de subida que solo llegan hasta Rancagua o San Fernando i de bajada que parten de San Fernando o Rancagua para Santiago: al tomar en cuenta esta observacion, obtendríamos para cada grupo de estos trenes un peso de arrastre diferente, pues las pendientes máximas por considerar no serian iguales, siendo todas ellas inferiores a 0,0162. Pero seria esta una consideracion que alargaria bastante nuestros cálculos.

Si se tiene ademas en cuenta que para ponernos a cubierto de toda eventualidad, debemos adoptar al final un coeficiente de seguridad, se concluye que no vale la pena de tomar en cuenta esa diversidad de grupos de trenes i que basta con calcular el peso de arrastre para la rampa máxima. En el peor de los casos, se cometerá así, teóricamente un pequeño error por defecto que es seguro no se presentará en la práctica.

Por lo que respecta a la velocidad que debemos considerar para el cálculo, ella será la velocidad máxima de los trenes de carga en ese trozo, que es igual a 36 kilómetros por hora segun el itinerario del tren núm. 41.

Hemos precisado, pues, el problema que nos ocupa en la forma siguiente: calcular el peso de arrastre de una locomotora cuyo peso adherente es de 38.425 kilos, sobre una rampa de 0,0162 con una velocidad de 36 kilómetros por hora.

Para tratar esta cuestion es necesario conocer la resistencia del tren, materia de que tratamos en detalle en el número siguiente. Aquí podemos adelantar que el resultado de nuestros cálculos nos han conducido a aceptar como tonelaje máximo de los trenes de carga 200 toneladas, sin contar el peso de la locomotora.

Pasando ahora a los trenes mistos debemos observar que su composicion, mui análoga a la de los de carga, permite aceptar para ellos el mismo tonelaje máximo.

Por fin, los trenes ordinarios i espresos de pasajeros tendrán, en jeneral, un tonelaje inferior a esa cifra acercándose a ella únicamente en la época de excesivo tráfico. Pero, si se tiene en cuenta que se trata de fijar la potencia máxima consumida i que el pequeño número de estos trenes, comparados con los de carga i mistos, tiende a aminorar grandemente todo error por exceso que se cometa al apreciar su peso de arrastre, se verá que es lógico fijar tambien el tonelaje máximo de los de pasajeros i espresos en 200 toneladas.

Concluimos, pues, con la adopcion de la cifra de 200 toneladas como peso máximo medio de arrastre para todo tren, sea éste de carga, misto o de pasajeros.

Hemos llegado así a una cifra bastante superior a la de 140 toneladas, que hemos adoptado como tonelaje medio anual, pero ese exceso está de acuerdo con las consideraciones ya espuestas, i en realidad no hace sino servir de comprobacion suficiente a nuestros cálculos.

3. *Resistencia de los trenes; justificacion de la fórmula empleada.* — Los elementos resistentes que es necesario vencer para determinar el movimiento de un tren son los siguientes:

- las resistencias propias de la locomotora;
- la resistencia del tren a la rodadura;
- la resistencia del viento.

Ademas, debe tenerse en cuenta la accion de la gravedad cuando el tren se encuentra en una seccion de línea inclinada sobre el horizonte; dicha accion tenderá a aumentar la resistencia cuando el tren sube una rampa i a reducirla cuando baja una pendiente. Por fin, las curvas de la via introducen resistencias complementarias, que es indispensable considerar.

Desde luego, podemos observar que, cuando el tren que se considera es arrastrado por una locomotora eléctrica, las resistencias propias del motor tienden a equipararse con la resistencia ordinaria de rodadura. En otros términos, se puede en este caso considerar el coeficiente de resistencia del tren i aplicar ese mismo coeficiente a la locomotora despues de haberlo aumentado en forma prudencial.

De las experiencias realizadas para fijar ese aumento puede concluirse que la razon entre el coeficiente de resistencia de la locomotora i el del tren es en término medio igual a 1,4. Luego, si fijamos ese coeficiente para el tren, quedará de hecho fijo el de la locomotora.

Los elementos que intervienen para producir la resistencia de rodadura del tren son principalmente:

- el frotamiento de los ejes de los vehículos
- el frotamiento de los rieles, debido a las asperezas de la superficie de la rodadura;
- la elasticidad imperfecta de los órganos solicitados, observacion que se aplica no solo al material rodante sino tambien a la via.

Segun Davis (1), la primera de esas causas de resistencia es casi del todo indepen-

(1) F. W. DAVIS.—*Résistance des trains*. (Bulletin de la Commission Internationale du Congrès des chemins de fer.—Abril, 1903.

diente de la velocidad, mientras que las últimas varían con la velocidad mas o menos proporcionalmente.

Por su parte, la resistencia del viento varía proporcionalmente al cuadrado de la velocidad i depende de la sección transversal i de la forma de las cabezas del vehículo i del número de vehículos que entran en la composición del tren.

Tanto la resistencia de rodadura como la debida al viento no pueden ser determinadas sino por vía experimental, cuestión que el señor Davis ha tratado de resolver mediante ensayos razonados i convenientemente conducidos.

Llamando:

V = velocidad, en kilómetros por hora;

T = peso total del tren, en toneladas;

S = sección transversal de los vehículos, en metros cuadrados;

n = número de vehículos, comprendido el motor;

b = coeficiente de frotamiento de los ejes, en kilogramos por tonelada de peso;

c = coeficiente de resistencia, en kilogramos por tonelada, de las demás acciones retardatrices de rodadura distintas de la anterior;

d = presión efectiva del viento, en kilogramos por metro cuadrado;

m = coeficiente que indica la sección proporcional de cada coche de remolque que se debe considerar en el cálculo del desplazamiento total del aire, podrían expresarse en la forma siguiente las resistencias de que se trata:

$$\begin{array}{ll} \text{resistencia de rodadura, en kilogramos por tonelada} & b + cV \\ \text{resistencia debida al viento, en kilogramos por tonelada} & \frac{d S V^2}{T} \left[1 + m (n-1) \right] \end{array}$$

Segun los ensayos de Davis de que da cuenta el artículo ya citado, los valores de los coeficientes b, c, d i m , son los siguientes:

$$\begin{array}{l} b = 2 \\ c = 0,04 \\ d = 0,0075 \\ m = 0,10 \end{array}$$

con lo cual se llega a estos resultados:

$$\begin{array}{ll} \text{resistencia de rodadura en kilogramos, por tonelada} & 2 + 0,04 V \\ \text{resistencia debida al viento, en kilogramos por tonelada} & \frac{0,0075 S V^2}{T} \left[1 + 0,1 (n-1) \right] \end{array}$$

El señor Davis observa asimismo que estos resultados se aproximan mucho de la práctica normal de los principales ferrocarriles de vapor.

Por nuestra parte, hemos creído conveniente aceptar esta fórmula que, como se acaba de espresar, puede aplicarse con bastante aproximación tanto al caso de locomotoras de vapor como a aquel en que se emplean locomotoras eléctricas.

Ella presenta sobre las conocidas hasta la fecha la ventaja de haber sido estudiada para este último caso i se distingue por su carácter racional de hacer depender ciertas resistencias de rodadura de la velocidad, lo que se realiza seguramente en la práctica.

El coeficiente de rodadura determinado por el señor Davis, se refiere a trenes lanzados, en los cuales la locomotora funciona como vehículo. Creemos, pues, que debe aceptarse siempre para la última en el caso ordinario, en que funciona como motor, un valor algo mayor, conservando entre ámbos coeficientes la relación 1,4 de que hemos hablado. Según esto se tendría:

resistencia de rodadura del tren, en kilogramos por tonelada.....	$2 + 0,04 V$
resistencia de rodadura de la locomotora, en kilogramos por tonelada.....	$1,4 (2 + 0,04 V)$
resistencia debida al viento, en kilogramos por tonelada...	$\frac{0,0075 S V^2}{T} \left[1 + 0,1 (n-1) \right]$

Por lo que respecta a la acción de la gravedad cuando el tren ocupa una posición inclinada de i sobre el horizonte, ella será dada evidentemente por la relación que sigue, en la cual i está espresado en milímetros:

componente de la gravedad paralela a vía, en kilogramos por tonelada... $\pm i$

Por fin la resistencia suplementaria debida a una curva de radio s puede espresarse por la resistencia de una rampa equivalente i_1 mediante la fórmula.

$$i_1 = \frac{500 \cdot a}{s}$$

en que a es la distancia entre los ejes de las cabezas de los rieles. Como en el caso que consideramos

$$a = 1,75$$

$$i_1 = \frac{875}{s}$$

Resumiendo lo espuesto anteriormente i llamando:

R = resistencia total del tren completo, en kilogramos;

t = peso del tren, en toneladas;

t' = peso de la locomotora, en toneladas,

tendremos:

$$T = t + t'$$

$$R = (2 + 0,04 V) t + 1,4 (2 + 0,04 V) t' + 0,0075 S V^2 \left[1 + 0,1 (n - 1) \right] + (\pm i + i_1) (t + t') \quad (1)$$

Sentada ya la fórmula que nos da la resistencia del tren, podemos pasar a la resolución del problema planteado en el número anterior i que consiste en calcular el peso t de arrastre de una locomotora cuyo peso adherente es de 38.425 kilogramos, sobre una rampa de 0,0162, con una velocidad de 36 kilómetros por hora.

Tenemos, tomando como peso de la locomotora el de la locomotora eléctrica,

$$t' = 70 \text{ toneladas}$$

$$V = 36 \text{ kilómetros por hora}$$

$$S = 6 \text{ m.}^2$$

$$n = 21, \text{ como término medio}$$

$$i = 16,2$$

$$i_1 = 0.$$

Por otra parte, la resistencia total máxima que esta locomotora es capaz de vencer puede estimarse en condiciones ordinarias en

$$\frac{1}{7} \times 38.425 = 5.500 \text{ k. mas o menos.}$$

Reemplazando estos valores en la fórmula (1):

$$5.500 = (2 + 0,04 \times 36) t + 1,4 (2 + 0,04 \times 36) 70 + 0,0075 \times 6 \times 36^2 \left[1 + 0,1 (21 - 1) \right] + 16,2 t + 16,2 \times 70$$

de donde:

$$t = 200 \text{ toneladas}$$

Este valor es el que nos ha servido en el número anterior para la apreciación del tonelaje de los trenes.

4. *Representacion gráfica de la fórmula adoptada.*—Debemos recordar que la cuestion primordial que tenemos en vista es la determinacion de las potencias absorbidas por la traccion de los trenes en actual servicio.

Esta determinacion puede hacerse para cada tren siempre que se conozca en un momento dado el valor del esfuerzo de traccion R en kilogramos, i la velocidad v , en metros por segundo; en efecto, llamando P la potencia absorbida correspondiente, en kilográmetros por segundo:

$$P = R v$$

Pero el valor de R es dado por la fórmula (1) i, por otra parte, el valor de v es

$$v = \frac{V \times 1.000}{60 \times 60} = \frac{5}{18} V$$

Luego

$$P = \frac{5}{18} V \left[(2 + 0,04 V) t + 1,4 (2 + 0,04 V) t' + 0,0075 S V^2 \left[1 + 0,1 (n-1) \right] + (\pm i + i_1) (t + t') \right]$$

En el caso que estudiamos:

$$t = 200 \text{ toneladas}$$

$$t' = 70 \quad \gg$$

$$S = 6 \text{ m}^2$$

$$n = 21.$$

Reemplazando estas cifras en el valor de P i simplificando, nos queda:

$$\pm i + i_1 = \frac{P - 166 V - 3,3 V^2 - 0,04 V^3}{75 V}$$

Llamando P' la potencia expresada en HP por segundo e i' la pendiente total:

$$i' = \pm i + i_1$$

$$i' = \pm i + P' = \frac{P}{75}$$

$$i' = \frac{P}{V} - \left(2,21 + 0,044 V + 0,00053 V^2 \right) \quad (2)$$

La fórmula (2) nos permite determinar la potencia P' siempre que se conozcan los valores correspondientes de V i de i' , i estos valores se deducen para cada tren, en un momento dado, del gráfico del itinerario utilizado en combinacion con el perfil longitudinal de la línea.

Se comprende que hacer el cálculo analítico para cada tren, de media en media hora, por ejemplo, seria una operacion estremadamente larga; esta consideracion nos ha demostrado la conveniencia de representar la fórmula (2) por una interpretacion gráfica.

Para realizar ésta, observemos que en dicha fórmula figuran tres variables P' , i' i V ; si fijamos el valor de una de ellas P' , podremos calcular los valores de i' que corresponden a una serie de valores de V . Si tomamos ahora dos ejes coordenados rectangulares i llevamos los i' en abscisas i los V en ordenadas, para cada par de valores quedará fijo un punto correspondiente a una potencia conocida; uniendo por curvas continuas los puntos que corresponden a una misma potencia, obtendremos el gráfico que deseamos.

Para hacer uso de este gráfico en la determinacion de la potencia P' de un tren en un momento dado, se procederá de la manera siguiente: se medirá en el gráfico del itinerario la velocidad V del tren en ese instante i se anotará la posicion que ocupa en la línea; el perfil de ésta nos dará entónces la inclinacion $\pm i$ del trozo de via ocupado por el tren i el radio ρ de la curva correspondiente i luego el valor de i_1 ; se llevará al gráfico el valor de $i' = i + i_1$ en abscisas i el de V en ordenadas; por los puntos así marcados se trazarán paralelas a los ejes, i estas paralelas determinarán por su interseccion un punto del plano; si este punto cae sobre alguna de las curvas de potencia, ella nos dará inmediatamente la potencia efectiva consumida por el tren que se considera i, si cae entre dos curvas de potencia, se determinará aquélla aproximadamente por una interpolacion lineal.

El procedimiento indicado anteriormente es el que se ha seguido para la construccion del gráfico interpretativo de la fórmula (2), que se acompaña, gráfico en el cual se han admitido velocidades variables entre 20 i 80 kilómetros por hora i pendientes variables de -10 a $+20$ milímetros.

Hemos limitado la velocidad en 20 kilómetros por hora, pues en la práctica será raro el caso en que un tren marche mas lentamente; es cierto que el gráfico del itinerario da para algunos trenes de carga una velocidad de 15 kilómetros por hora i aun ménos pero ello se explica si se tiene presente que ese gráfico ha consultado en las estaciones las paradillas estrictamente necesarias para los cruzamientos, siendo así que esas paradillas son siempre mas largas.

La fórmula (2), i luego su gráfico representativo, será aplicable siempre que no intervenga la accion de los frenos; esta intervencion, que será necesaria siempre que la fórmula dé valores negativos para P' , exigirá un consumo de energía que avaluaremos mas adelante.

5. *Gráfico de las potencias consumidas; potencia máxima absoluta; potencia media máxima diaria, i potencia media anual.* — Para determinar la potencia máxima absoluta, seria necesario conocer en cada instante la potencia absorbida por la traccion de los trenes en actual servicio.

En la práctica se obtendrá una aproximación suficiente determinando esa potencia de media en media hora.

En el anexo núm. 3 hemos anotado los trenes que se encuentran sobre la línea cada media hora, la pendiente del trozo de línea que cada tren ocupa, el radio de la curva i la velocidad correspondientes; partiendo de esos datos i siguiendo la marcha indicada en el número anterior, hemos determinado la potencia efectiva P' , consumida por cada tren.

Debemos observar que, cuando la fórmula (2) ha dado un valor negativo para P' , hemos inscrito en la columna correspondiente del anexo a que nos referimos el valor 0, En efecto, mas tarde tomaremos en cuenta la potencia necesaria para la aplicación de los frenos, que es entónces indispensable.

Por fin, cuando hemos debido considerar un tren detenido en una estación, lo que corresponde a un escalon del gráfico del itinerario, hemos admitido que ese tren podrá encontrarse maniobrando en la estación i le hemos aplicado la potencia consumida por las locomotoras de servicio que hemos estimado en 30 H. P.

En la forma indicada, hemos podido calcular las potencias totales efectivas absorbidas por la tracción; hemos distinguido al mismo tiempo las que corresponden a los trenes de carga i a los de pasajeros.

Debemos tambien tener en vista la potencia absorbida por las locomotoras de servicio en las estaciones, potencia que puede estimarse en 30 H. P. para cada una; como en la Segunda Sección hai afectas a dicho servicio 10 locomotoras, de las cuales hemos supuesto que funcionen constantemente los dos tercios, la potencia efectiva consumida por este capítulo puede estimarse en 200 H. P.

Los resultados finales de estos diversos cálculos aparecen consignados en el anexo núm. 6.

Esos resultados nos permiten construir el gráfico de las potencias, para lo cual llevamos los tiempos en abscisas i las potencias consumidas en ordenadas: la construcción de este gráfico, que acompañamos, se explica por sí sola.

Dicho gráfico pone inmediatamente de manifiesto que el consumo máximo de potencia tiene lugar a las $7\frac{1}{2}$ A. M. i que alcanza a la cifra de 4.890 H. P. Del mismo modo, el consumo medio diario máximo es igual a 2.410 H. P.

Podemos por fin establecer las cifras siguientes para las potencias efectivas necesarias:

potencia máxima absoluta.....	4.890 H. P.
potencia media anual.....	1.970 »

El valor de esta última cantidad ha sido determinado tomando el término medio entre las potencias medias diarias máxima i mínima; esto equivale a suponer igualdad de tiempo para los servicios máximo i mínimo, lo que, si no es exacto, se aproxima bastante de la realidad.

6. *Observaciones sobre los trabajos absorbidos; trabajo total diario i anual.*—Es interesante calcular los trabajos realmente gastados en las llantas de las ruedas por el

servicio de traccion, pues, todo estudio económico de la traccion debe necesariamente tomarlas en cuenta.

Espresando estos valores en funcion del caballo hora se obtiene:

trabajo total máximo diario.....	$2.410 \times 24 = 57.840$ H. P. hora
trabajo total medio diario.....	$1.970 \times 24 = 47.280$ » »

i el trabajo total medio anual será:

$$47.280 \times 365 = 17.250.200 \text{ H. P. hora}$$

Por fin es interesante calcular los consumos máximo i medio de trabajo por tren kilómetro para lo cual bastará determinar el número máximo i medio diario de trenes kilómetros.

Del itinerario se obtienen los siguientes valores:

número máximo diario de trenes kilómetros.....	8.323
número medio diario de trenes kilómetros.....	8.000

De donde:

energía máxima consumida por tren kilómetro	$\frac{2.210 \times 24}{8.323} = 6,38$ H. P. hora
energía media consumida por tren kilómetro	$\frac{1.770 \times 24}{8.000} = 5,31$ » »

Naturalmente para el cálculo anterior no se han tomado en cuenta las locomotoras de servicio en las estaciones.

Para terminar, debemos insistir sobre la observacion de que los trabajos considerados hasta aquí son los actualmente gastados en las llantas de las ruedas. Para obtener los trabajos consumidos seria necesario tomar en cuenta el rendimiento de los motores de traccion. En todo caso deberá adoptarse un coeficiente de seguridad para ponerse a cubierto de las eventualidades que pudieran presentarse.

(Continuará)

Pag 532



Gráfico representativo de la fórmula de las resistencias de tracción.
para un tren de 200 toneladas de peso arrastrado con
locomotora de 70 toneladas.

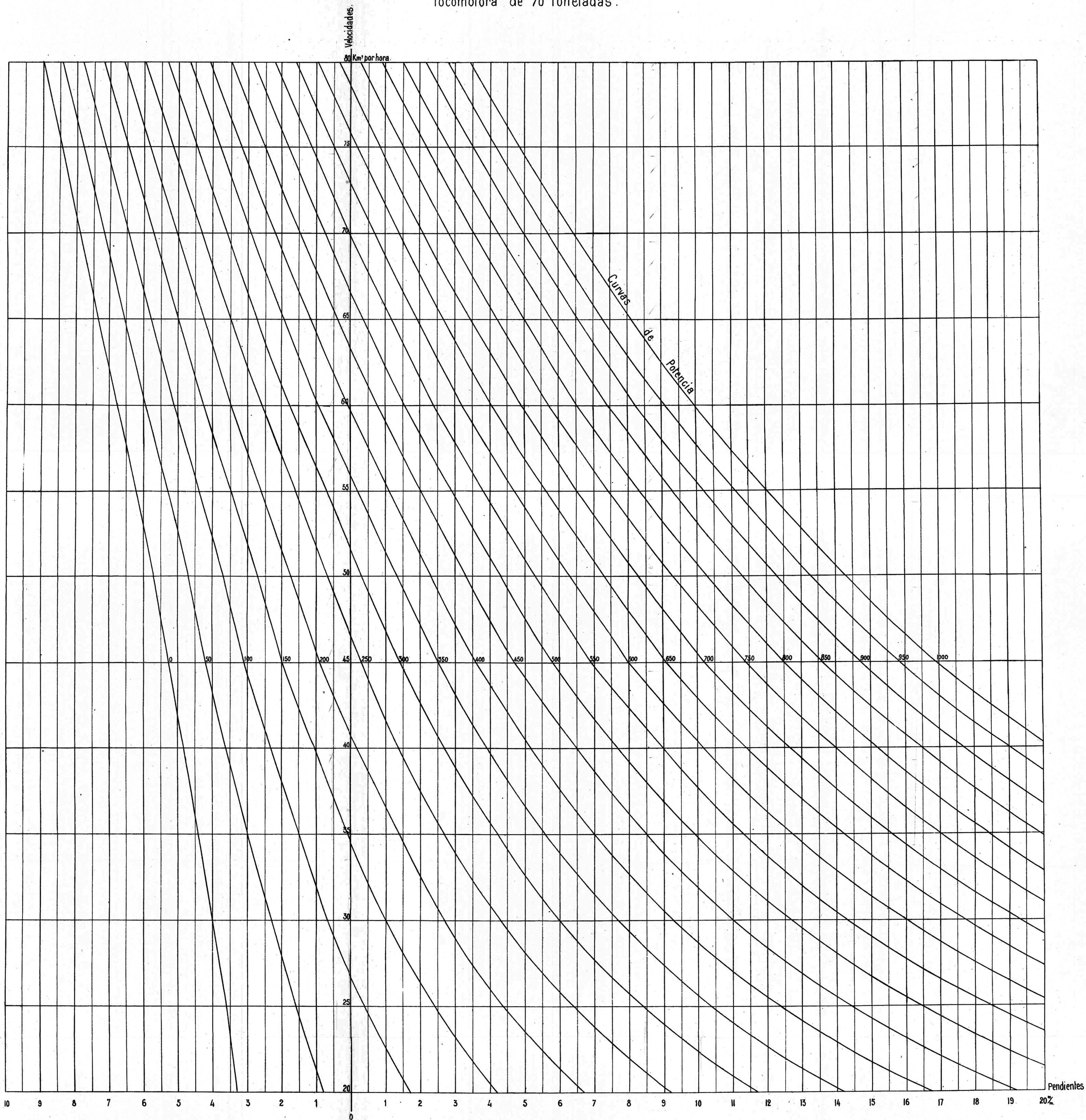


GRÁFICO DE LAS POTENCIAS CONSUMIDAS

