

POSIBILIDADES DE LA LOCOMOTORA DE VAPOR

Por FRANCISCO JIMÉNEZ ONTIVEROS, Ingeniero de Caminos.

Se resumen en el presente artículo una serie de datos y de recientes experiencias que ponen claramente de manifiesto que las posibilidades de la locomotora de vapor están aún muy lejos de agotarse, lo cual debe ser tenido muy en cuenta, a juicio del autor, en cualquier estudio que se haga sobre la reorganización del tráfico en general de un país.

Con motivo de una conferencia que el 22 de noviembre pasado tuve el honor de dar en Tetuán (Marruecos) sobre el tema "La electrificación de ferrocarriles y los nuevos ferrocarriles en construcción", primera del curso breve que se ha celebrado como complemento a la brillante Exposición de Obras Públicas allí inaugurada dos días antes, tuve ocasión de reunir algunos datos sobre las posibilidades actuales y futuras de la tracción por vapor. Quizá no sobren los indicados datos, ante los problemas que sugiere el tema de mi conferencia y a continuación los inserto, debiendo hacer la aclaración siguiente: La primera parte del breve estudio que sigue, fué preparada por mí en el año 1940, y la segunda, está tomada íntegramente del estudio de M. Chan, aparecido en la *Revue Générale des Chemins de Fer y Revista de Ferrocarriles y Tranvías* (1942).

¿Cuáles son las posibilidades presentes y futuras de este sistema de tracción? ¿La locomotora de vapor ha llegado ya a su máximo perfeccionamiento? ¿Está en la actualidad en decadencia en relación con los demás sistemas?

Hasta que las grandes electrificaciones tuvieron lugar en Europa y en América (Italia 1901-1902, La Valtelina-Giovi, etc.; Suiza, 1906, Simplón; Estados Unidos, Butte, Anaconda and Pacific Ry, 1913; Chicago, M. Saint-Paul, 1919, etc.), y hasta que los trenes y automotores Diesel se desarrollaron también (Suecia, 1913, F. C. de Mellersta-Salemanlands, motores Atlas, y posteriormente en Alemania, Hungría, Dinamarca, Holanda, Francia, Estados Unidos, y muy especialmente cuando en 1933, en Alemania, tuvieron lugar los ensayos de automotores a grandes velocidades), no se pensó en que la locomotora de vapor había llegado al último grado de su desarrollo, para dejar paso a otros adelantos de la técnica. Pero, ¿esto es así? ¿La locomotora de vapor, acaso desde 1933, no ha experimentado ningún notable adelanto que la ponga en condiciones de resistir con éxito la competencia de la tracción eléctrica y Diesel?

Esta cuestión del valor de la locomotora de vapor se refiere a tres cosas:

1. Aptitud para obtener grandes y pequeñas potencias.
2. Aptitud para obtener fuertes velocidades.
3. Economía térmica en relación con los otros dos sistemas.

Por lo que toca a la primera, mucho se ha discutido sobre la limitación de la potencia a que están sujetas las locomotoras de vapor. "Con frecuencia — dice H. Nordmann — se cita la superioridad de la locomotora eléctrica, ya que ésta puede captar, mediante la línea de distribución de energía, toda la potencia que sea menester, mientras que la de vapor se ve reducida a sus propios medios, por conducir sobre sí misma la fuente de energías para la tracción". Esto es exacto en el terreno teórico, pero en el práctico la locomotora de vapor es susceptible de tener la potencia que sea necesaria. En la actualidad, pese al grave inconveniente de que la alimentación del carbón cuente con la dificultad del agotamiento físico del fogonero, se obtiene potencia continua de 2 700 CV. indicados. Aparte de esto, las locomotoras de carbón pulverizado resuelven la alimentación automática, y aun en las de tipos diferentes no es difícil una alimentación por medios mecánicos. Según el doctor Metzeltiu, la potencia máxima de una locomotora de vapor debe ser evaluada en 8 000 CV. En este sentido de grandes potencias, las locomotoras de tipo Garrt o Franco, articuladas y de ejes múltiples, pueden llegar a tener potencias muy elevadas.

En Francia se han obtenido potencias indicadas superiores a 3 000 CV., y en los Estados Unidos hay muchos tipos con potencias indicadas de 4 000-5 000 caballos vapor. Para concretar: las locomotoras 4-6-4, del New York Central, han desarrollado una potencia indicada máxima de 4 700 CV. en los ensayos dinamométricos (tipo I-3.^a) por hora, y una potencia máxima en el gancho de 3 880 CV., a 105 kilómetros por hora. Con H. Nordmann, podemos decir que no existe límite natural para la potencia de una locomotora de vapor.

En relación con las potencias pequeñas existe más aún la adaptabilidad a ellas de la locomotora

de vapor. Como se indicará, los trenes ligeros de vapor son un medio sumamente eficaz de luchar con la competencia de la carretera, y su uso está muy extendido. En Alemania, la locomotora 2-C-1, tipo 03, sobre la línea de Hamburgo, ha alcanzado velocidades de 140-150 Km./h. En esta locomotora, una velocidad continua de 140 Km./h. ha sido posible mantenerla.

Respecto de la segunda cuestión — aptitud de la locomotora de vapor para obtener grandes velocidades —, se ha podido comprobar que el sistema de vapor corresponde al segundo lugar. Citemos, para concretar, la locomotora de vapor recalentado 1-D-1, serie 42, de Reichsbahn alemana. Peso, 92,6 toneladas en vacío. Idem orden de marcha, 101,7. Idem adherente, 70-78 toneladas. Velocidad máxima para el transporte de mercancías, 90 Km./h.

Queda, pues, la tercera cuestión, o sea su rendimiento económico. Hablamos aquí — por ahora — de su rendimiento intrínseco, no en relación con los demás sistemas de tracción, y vamos a ver cómo ha sido mejorado últimamente.

Su rendimiento económico no estriba ni en el precio de adquisición, que por kilogramo es bastante inferior a la locomotora eléctrica, y más aún a la Diesel. Tampoco estriba en el coste de conservación, ya que la organización moderna de los talleres, la experiencia larga, etc., ha permitido obtener recorridos y amortizaciones muy superiores a los otros sistemas. El rendimiento económico estriba en su consumo por cada caballo vapor obtenido en el gancho. A pesar de que el vapor recalentado parece que iba a ser la última medida posible para mejorar el rendimiento térmico — y fué empleado ya antes de 1914 —, se ha conseguido, sin embargo, modernamente un avance en este sentido. En efecto: de 300° C. se ha pasado a una temperatura de 400°, máximo compatible con una buena lubricación. El rendimiento para el conjunto de tipos de locomotoras se ha aumentado de un 5 a un 12 por 100. Pero si la locomotora nueva es de turbina, la economía oscila en un 25 a un 40 por 100 (ensayos de la Krupp en los ferrocarriles del Reich). Al mismo tiempo la presión del vapor ha sido aumentada, llegando en la actualidad al máximo de 20 Kg. por cm.² (de 1930 a 1939). Puede decirse que en la actualidad una locomotora con condensación, vapor recalentado de 375 a 400° C. y presión de 15 a 20 Kg. por cm.² consume de 5 a 5,5 Kg. de vapor por caballo/hora indicado. Para las locomotoras de carbón pulverizado este consumo es aún menor. Este valor dado es medio, ya que las locomotoras de carbón, de turbinas de la casa Krupp, obtienen una economía de más del 40 por 100 sobre las normalmente usadas en los ferrocarriles alemanes. Del mismo modo, se usan presiones más elevadas de los 20 Kg. por cm.² dichos anteriormente (se pensó por Löfflert-Schwartz-Kopff en presiones de 120 Kg.); pero se fijan los dichos 20 Kg. como

tipo máximo, normal, dentro de buenas condiciones de trabajo de los materiales.

Naturalmente, el consumo de vapor por CV./h. indicado y efectivo varía con la velocidad. Dicho valor — 20 Kg. por cm.² — se entiende para un régimen normal de funcionamiento de las locomotoras.

El conjunto de las modificaciones y transformaciones que ha sufrido la locomotora de vapor desde 1930 se expondrá inmediatamente. Nos resta precisar algo más el rendimiento de la locomotora de vapor.

El rendimiento total o global de una locomotora consta de tres partes:

- a) Rendimiento de la caldera.
- b) Idem del motor.
- c) Idem de los mecanismos.

El conjunto de estos tres rendimientos nos dará el total global. Teóricamente, el rendimiento a) depende de la forma del hogar, de las dimensiones de la parrilla, de la clase de combustible, del sistema de alimentación del combustible, de la superficie de calefacción, del calor perdido por radiación, etc. Para locomotoras modernas, de simple expansión o de compuesta, con vapor recalentado, presiones del vapor de 20 Kg. por cm.², temperatura de vapor de 400°, este rendimiento puede estimarse en un 85 por 100.

El rendimiento b) del motor depende del consumo de vapor por CV./h. indicado. Para las locomotoras dichas antes este consumo, en marcha media normal, puede suponerse en 5 Kg. por CV./h. indicado. El rendimiento del motor viene a ser un 20 por 100.

El rendimiento c) de los mecanismos significa la relación entre la potencia indicada en la locomotora y la efectiva en las llantas. Este rendimiento es en las locomotoras modernas de un 85 por 100.

El rendimiento global será:

$$\mu = 85 \times 20 \times 85 = 14,45 \text{ por } 100.$$

Pero el rendimiento en la práctica, en servicio, no es tan elevado, debido a las pérdidas de carbón en encendidos, paradas (*stand by losses*, de los americanos), etcétera. Para hallar este rendimiento no hay otra forma que recurrir a los datos experimentales, y podemos citar los siguientes entre los más modernos:

Tanto por 100

Locomotoras de mercancías unificadas de los ferrocarriles alemanes, serie 43, citada por Nordmann (1935)	10
Experiencias de M. Nadal:	
Simple expansión y vapor saturado.....	5,1
Doble ídem íd.	5,9
Simple ídem y vapor recalentado hasta 320°.....	6,1
Doble ídem íd.	6,5
Ídem y agua de alimentación a 95°.....	9

Datos de M. A. Parmentier (1938: B. A. I. Ch. F., septiembre 1938):

I. Loc. 231. D. Tipo Pacific. Temperatura hasta 380° C.:

Velocidad	Potencia indicada	Potencia efectiva	Consumo HP/h. indicado	Consumo HP/h. efectivo	Rendimiento global	
			Kgs.	Kgs.	Indicado	Efectivo
100	1 988	1 507	0,89	1,170	0,09	0,06
	2 150	1 600	0,86	1,150	0,09	0,07
120	1 714	1 121	0,98	1,500	0,08	0,05
	2 000	1 300	0,97	1,490	0,08	0,05

II. Loc. 231 G. Pacific.

Consumos algo inferiores: 100 Km./h. (efectivos): 0,94 y 0,96 valores extremos.

Rendimientos mayores: 100 Km./h. indicado, 0,11; efectivo, 0,08.

III. Loc. 231 H.

100 Ton./h.: consumo, 0,881; 120 Km./h., 0,89.

Resulta, pues, que el rendimiento efectivo, en régimen de marcha, de una locomotora de vapor moderna no pasa del 6 por 100. Quizá en condiciones favorables, en recorridos sin paradas, a velocidad prácticamente constante, con alimentación de carbón pulverizado y turbina con carbón de más de 7 000 calorías por kilogramo, etc., pudiera elevarse este rendimiento hasta el 10 por 100. Para España, con los perfiles característicos de nuestras líneas, no se puede pensar en este rendimiento.

Ahora bien: volviendo al punto de partida, es un hecho de la experiencia que en ocho años — 1930-1938 — las locomotoras de carbón han sufrido importantes mejoras, que, por lo que toca a su rendimiento térmico, se traducen en una economía del 25 al 30 por 100.

Perfeccionamientos recientes llevados a cabo en las locomotoras de vapor de tipos normales; ensayos de tipos nuevos: pistones a alta presión y turbinas. - Formas aerodinámicas.

Para completar el párrafo anterior, para dar una idea de la evolución de la locomotora de vapor y sus posibilidades ante los progresos de la tracción eléctrica y Diesel, es necesario resumir los adelantos o perfeccionamientos verificados en ella en los últimos años. Esto ayudará a concluir algo de carácter objetivo en la cuestión de la lucha de los sistemas varios de tracción. Procediendo por orden, se tiene:

a) *Elevación de la presión del vapor y de la temperatura.*

La presión máxima normal, en un período anterior a 1930, era de 15 Kg. por cm.². Bien que desde 1930 hasta hoy no se haya hecho ningún progreso (conclusión primera del Congreso de París, junio 1937) en cuanto a la presión se refiere. Pero es evidente que desde la Gran Guerra, fecha no muy alejada, la presión ha subido de 14 Kg./cm.² a 25, pudiéndose tomar el valor de 20 Kg./cm.² como medio y normal, compatible con las buenas condiciones de trabajo de los materiales metálicos. Esto supone un gran adelanto y ha permitido elevar el rendimiento térmico en un 25 a un 30 por 100.

b) *Elevación de la temperatura del vapor recalentado.*

Si bien el vapor saturado es un vehículo de trabajo físicamente invariable, no sucede lo mismo con el vapor recalentado. Éste depende, en su trabajo, de la temperatura. Ésta ha pasado de 300° C., en un período anterior a 1930, a 400, que es el máximo compatible con una buena lubricación y con las condiciones de trabajo de los materiales en contacto con el vapor. Esto ha permitido que el consumo específico baje más del 13 por 100. Según Nordmann, no es tan elevada la economía obtenida en el consumo de vapor, y debe fijarse en un 5 por 100, y el consumo específico de carbón en el gancho, para velocidades normales de 100 Km./h., no pasa de una economía del 6 al 11 por 100. En todo caso hay que aceptar cifras más elevadas que las dadas por Nordmann, porque él hace la comparación con tipos anteriores muy perfeccionados.

c) *Nuevas tendencias.*

La simple expansión ha ganado terreno, especialmente en Alemania. Su construcción y conservación son, evidentemente, más baratas. La Reichsbahn alemana ha construido cuatro tipos de locomotoras de simple expansión, de dos a tres cilindros, para presiones de 20 Kg./cm.². Con la simple expansión se puede elevar hasta 450° C. la temperatura del vapor.

El uso de turbinas de vapor sin condensación es otra nueva tendencia. Un tipo de locomotoras de turbinas ha sido construido en Alemania en 1932: tipo 2-C-2. En los ensayos sobre banco de pruebas, según Günther, se ha obtenido una economía de carbón del 30 por 100. Sin embargo, en servicio sólo se obtuvo un 14 a 16 por 100. No está muy adoptado este tipo de locomotoras, y la conclusión del Congreso Internacional de Ferrocarriles de París (1937) dice simplemente: "Los ensayos de locomotoras de turbinas se prosiguen con tendencia a abandonar la condensación".

d) Mejoras y transformaciones en varios órganos.
Admisión. Escape. Formas aerodinámicas.

El mejoramiento y alargamiento de la admisión y escape, así como el aumento de las secciones del paso del vapor, producen una disminución de la caída de presión entre la caldera y los cilindros, y facilitan la salida del vapor de escape, mejorando a la vez el circuito total del vapor. La experiencia mundial ha demostrado la conveniencia de efectuar estas transformaciones en las locomotoras, sobre todo en los Esta-

una vaporización de 57 Kg. por m.² de parrilla y hora, se tiene:

Velocidad 100 km./h. {	Locomotora aerodinámica 1455 CV.	{ Aumento potencia 15,5 %.
— ordinaria. . . 1260	—	—
Velocidad 120 km./h. {	— ordinaria. . . 1075	{ Aumento potencia 27 %.
— aerodinámica 1365	—	—
Velocidad 140 km./h.	Aumento de potencia con locomotora aerodinámica, del 48 por 100.	

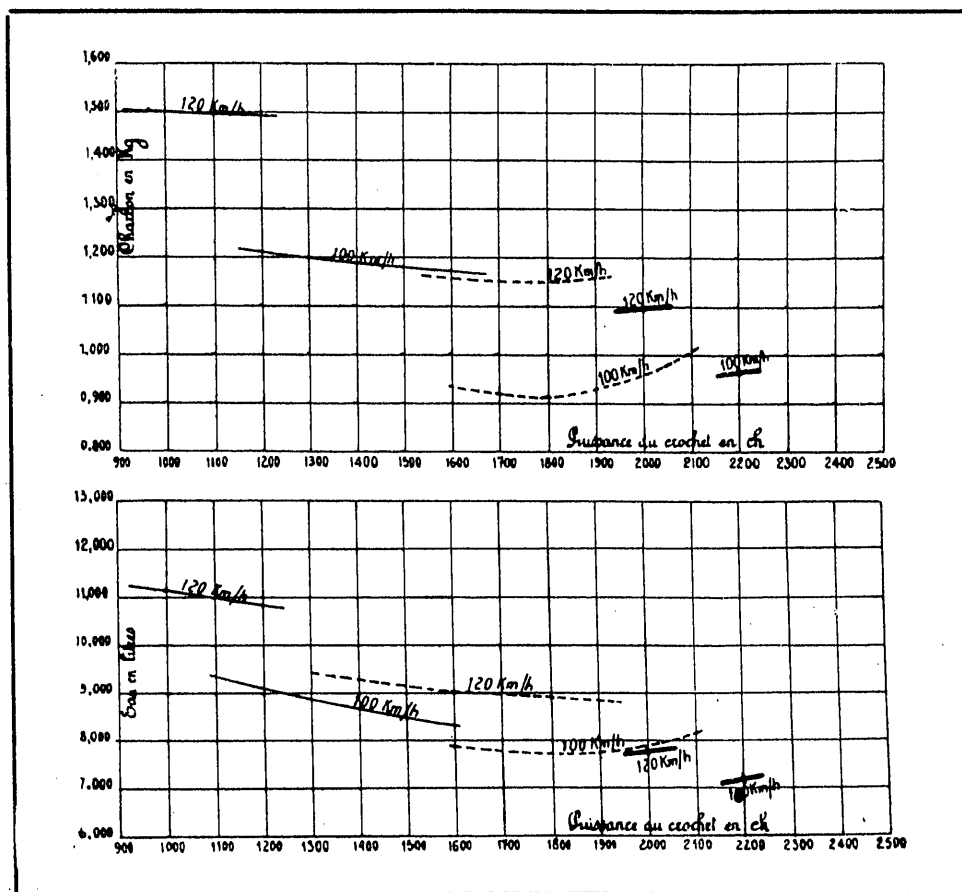


Fig. 1.^a — Potencias y carbón consumido.

dos Unidos, donde se ha dado preferencia a las modificaciones del escape. Incluso es muy conveniente aumentar las secciones de la chimenea. Todo ha contribuido a reducir la contrapresión, mejorando el rendimiento de la locomotora.

Hay una modificación moderna del mayor interés, y es la que se refiere a la adopción de formas aerodinámicas en el exterior de las locomotoras. Debemos detenernos en este punto. En primer lugar, conviene citar los resultados obtenidos en Alemania. Según Günther, se han hecho ensayos comparativos en línea con locomotoras tipo 2-3-1 y serie 03, Pacific. Para

En relación con el rendimiento térmico, la potencia desarrollada en los cilindros se ha aumentado de 20 a 40 CV. Ensayos hechos durante un año han dado por resultado, en trenes expresos ordinarios:

Locomotora/Km.: economía de carbón.....	11,7 %
Ton./Km.: ídem íd.	15,2 "

Los resultados de estos ensayos fueron puestos en duda por M. Parodi, en el curso de la discusión de una de las sesiones del Congreso de París. M. Günther respondió que estas cifras eran el resultado de ensayos y experiencias de todo punto, hechos con gran

precisión. Posteriormente, el citado H. Nordmann ha publicado un trabajo concluyente sobre este asunto. Se demuestra en él que el aumento de potencia obtenido en una locomotora 2-C-I, completamente aerodinámica, es muy elevado con relación a la misma locomotora no aerodinámica. Una locomotora de los ferrocarriles del Reichs, serie 03, a la velocidad de

tipo y serie. La primera demuestra el aumento de potencia de una locomotora aerodinámica sobre la misma sin transformación, completa y parcialmente. El

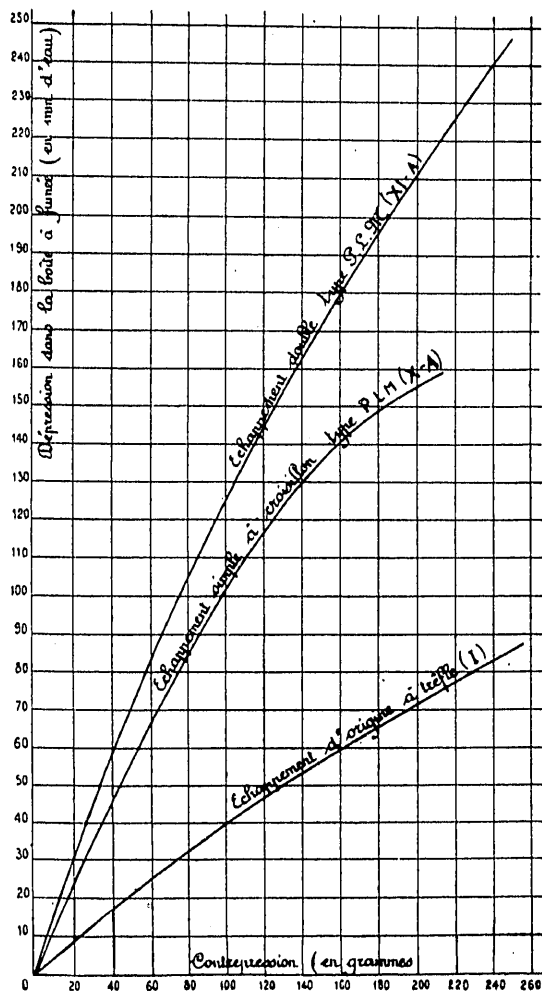


Fig. 2.ª — Curvas características comparadas de escapes P. L. M.

140 Km./h., gana 400 CV. en relación con la misma no aerodinámica. Como es sabido, la potencia varía con la velocidad, así como el rendimiento térmico. Las figuras 1.ª y 2.ª corresponden a las locomotoras 231-D y 231-G, tipos Pacífic, según los estudios de A. Parmentier, que se explican por sí mismas, ejemplo de la influencia de las transformaciones que acabamos de indicar. Nordmann construye las adjuntas curvas, donde se demuestra la diferencia entre una locomotora aerodinámica y otra corriente del mismo

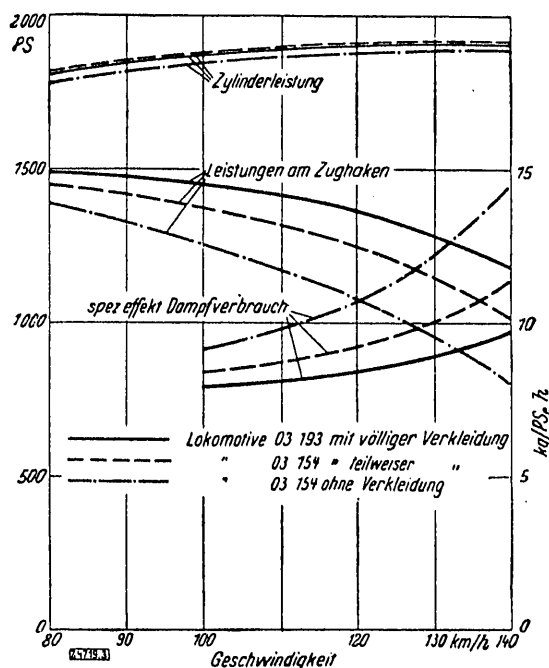


Fig. 3.ª — Potencias comparadas de la locomotora 03, completa, parcial y no reformada aerodinámicamente.

EXPLICACIÓN DE TÉRMINOS ALEMANES

Zylinderleistung = Potencia indicada.
Leistungen am Zughaken = Potencia en el gancho.
Spez. effekt. Dampfverbrauch = Consumo específico efectivo de vapor.
Mit völliger (teilweiser) Verkleidung = Forma aerodinámica completa (parcial).
Ohne Verkleidung = Sin forma aerodinámica.
Kg/PS_e h = Kg. por caballo efectivo y hora.
Geschwindigkeit = Velocidad.

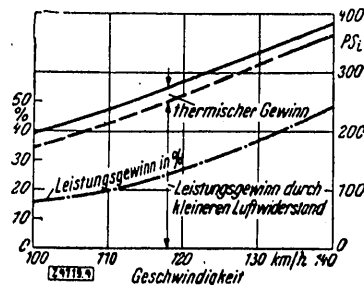


Fig. 4.ª — Aumento de potencia, debido a la forma aerodinámica completa.

Thermischer Gewinn = Aumento térmico.
Leistungsgewinn durch kleineren Luftwiderstand = Aumento de potencia, debido a la reducción de la resistencia del aire.
PS_i = Caballo indicado.

orden de magnitud de estos resultados — dice Nordmann — asombrará ciertamente a muchos lectores y, sin embargo, los resultados no pueden ponerse en duda. El aumento de potencia crece con la velocidad,

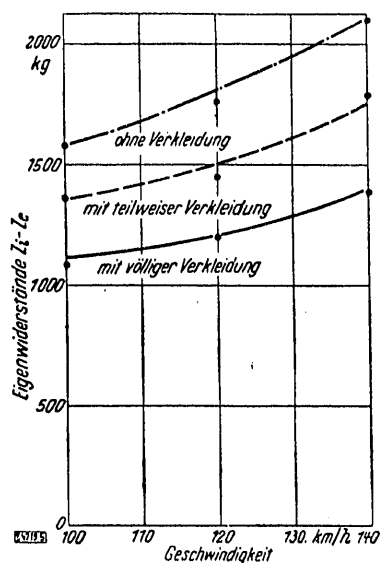


Fig. 5.ª — Resistencias propias de las locomotoras 03, completa, parcial y sin forma aerodinámica.

Eigenwiderstände = Resistencias propias.

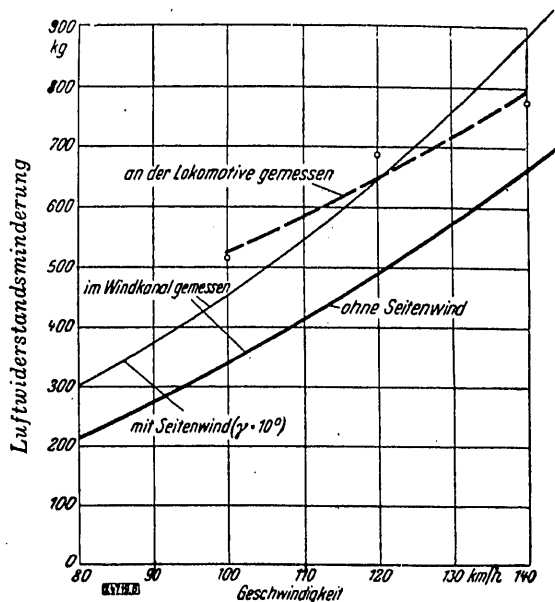


Fig. 6.ª — Reducción de la resistencia del aire, debida a la forma aerodinámica, completa, con ensayos hechos en túnel aerodinámico.

An der Lokomotive gemessen = Medida sobre la locomotora.
Im Windkanal gemessen = Medida en túnel aerodinámico.
Mit (ohne) Seitenwind = Con (sin) viento de costado.
Luftwiderstandsminderung = Reducción de la resistencia del aire.

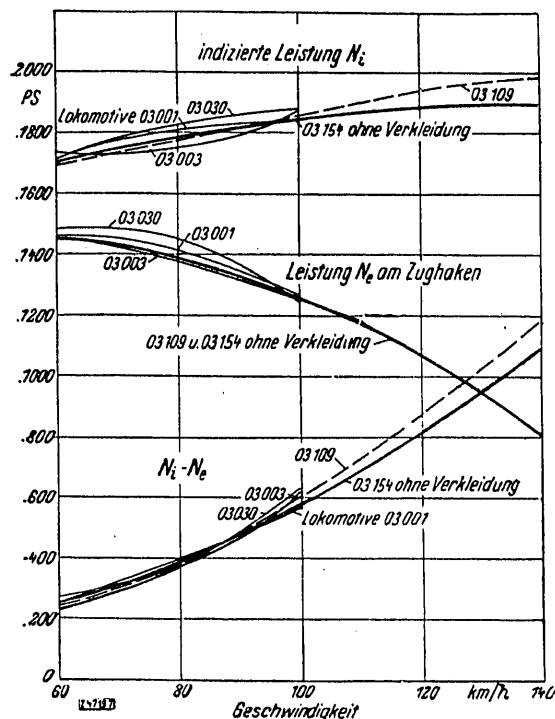


Fig. 7.ª — Potencia de todas las locomotoras 03, no reformadas aerodinámicamente; caldera trabajando en el límite superior de su capacidad [57 Kg. × m.²/h.].

Indizierte Leistung = Potencia iniciada.

Leistung am Zughaken = Potencia en el gancho de tracción.
Ohne Verkleidung = Sin revestimiento aerodinámico.

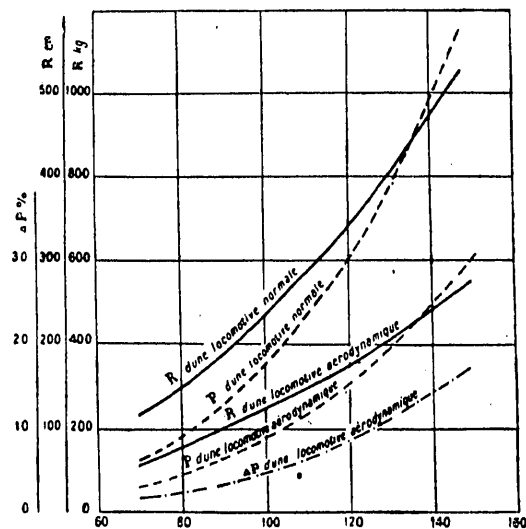


Fig. 8.ª — Gráfico comparativo de ciertas características de una locomotora ordinaria y otra aerodinámica.

P = Potencia necesaria para vencer la resistencia del aire.
Δ P = Diferencia en por ciento de la ventaja de una locomotora aerodinámica.

y es muy importante a velocidades elevadas. Antes hemos dado en cuadro los valores numéricos. La figura 3.^a se refiere a una transformación aerodinámica completa. La figura 4.^a muestra la resistencia propia de las locomotoras, en el mismo supuesto, así como la figura 5.^a. La figura 7.^a resume los resultados. La figura 8.^a corresponde a una locomotora Pacific, según H. Mortin.

Como resumen de las transformaciones de que es susceptible una locomotora de vapor de tipo corriente (1930), podemos citar las que se contienen en el trabajo de A. Parmentier, ya aludido.

1. Mejoras en el escape:

a) Ensanchamiento de los escapes.

b) Ensanchamiento de las secciones de paso del vapor y del gas de combustión.

c) Aumento de la superficie de contacto entre el gas y el vapor.

2. Idem paso del vapor a los cilindros.

3. Mejoramiento del engrase.

4. Colectores de recalentamiento en cámaras separadas.

5. Aligeramiento de la distribución.

6. Formas aerodinámicas.

* * *

Para completar la exposición anterior, es útil dar un resumen de las aplicaciones más recientes e importantes de la tracción por vapor.

Perfeccionamientos principales conseguidos de 1910 a 1940.

La locomotora Pacific de 1910, que se puede tomar como punto de partida, era una máquina timbrada a 16 Kg./cm.², provista de un recalentador introducido algunos años antes, como consecuencia de experiencias alemanas, alcanzando una temperatura de unos 280 a 300°. La alimentación estaba asegurada por inyectores de vapor vivo. El escape era de un tipo muy simple, por cono o válvula, o, en el sistema más perfeccionado, por trébol. La máquina era de tipo Compound. En total desarrollaba, como ya se ha dicho, cerca de 1 300 CV. en el gancho de tracción, a 120 kilómetros por hora, con un consumo que se elevaba a menos de 1,5 Kg. por CV./hora.

Como ejemplo, indicaremos que sobre una de las grandes arterias, París-Marsella, las máquinas Pacific 231-C del Sur-Este, remolcaba, en 1913, trenes de 327 toneladas a la velocidad comercial de 82,8 kilómetros por hora.

Vamos a detallar las principales etapas de modificación de esta máquina:

Calentadores del agua de alimentación. — Calentada el agua del ténder por el vapor recuperado del escape, de otra manera perdido, se ha podido elevar la temperatura del agua de alimentación de 15° a cerca de 95 ó 100°. La ganancia teórica es precisamente del 12 por 100; la ganancia práctica es menor; pero, de todos modos, estimable, y proporciona un aumento de potencia sensible, dando, además, al maquinista facilidades para la conducción de la máquina. Desde 1924, las aplicaciones tomaron gran incremento bajo la forma de inyectores de vapor de escape o de bombas para calentar el agua por mezcla o superficie. Se puede decir: actualmente no se construyen locomotoras sin calentadores de agua, y la mayor parte de las locomotoras antiguas importantes han sido provistas de ellos. En 1936 existían en Francia 4 292 aplicaciones, predominando el tipo de condensador por mezcla.

Recalentadores de vapor. — El vapor recalentado ha sido uno de los medios más eficaces para aumentar la potencia de las máquinas. Desde 1925 se trató de sobrepasar notablemente los 280° de la máquina de 1913, consiguiéndose desde 1926 elevar la temperatura del vapor hasta cerca de los 350° por una mejor disposición de las secciones de los tubos de los recalentadores del sistema Schmidt. La ventaja obtenida se puede estimar en un 15 por 100, o sea un 1 por 100 de rendimiento por cada 5° de recalentamiento. La Pacific de 1913, de la que venimos tratando, ha aumentado, en total, su potencia hasta los 1 600 CV. por el calentamiento del agua de alimentación y recalentado del vapor. Pero los ensayos han sido continuados, especialmente por la Compañía de P. O., con objeto de alcanzar la temperatura de 400°, que es el límite que permiten los aceites de engrase para que no se deterioren las piezas, y que era, por otra parte, necesaria para el vapor a 20 Kg./cm.², que se empezaba entonces a emplear.

Uno de los modelos utilizados en Francia ha sido el recalentador Hocolet, cuyos elementos tienen sección anular. Su fabricación es posible hoy en perfectas condiciones, gracias al empleo de acero especial, con el 6 por 100 de cromo y 0,25/0,60 de molibdeno, que es el acero de las máquinas de *cracking* del petróleo, y que resiste bien el calor. Otro modelo es el 5.P.4, de la Compañía de Recalentadores. Se compone de cuatro tubos de ida del vapor, y un quinto, colocado en el centro, de vuelta.

Estos recalentadores tienen la ventaja de proporcionar una alta temperatura con una débil pérdida de carga.

En relación con los calentadores con los que se alcanzaban los 300°, la economía encontrada en los ensayos ha sido de 13 por 100. Son las producciones más interesantes de las oficinas de estudios de locomotoras de Francia.

Timbre de las calderas. — A partir de 1929, el timbre de las calderas francesas se ha elevado progresivamente de 16 Kg./cm.². (Entre las primeras calderas timbradas a 20 Kg./cm.², citaremos: la locomotora 231-H-141, P. L. M. de 1929; la locomotora 241-C-I, P. L. M. de 1931, de virolas de acero al níquel; la locomotora 241-E, de 1930; la locomotora 240-P. O. de 1932.) Con un mismo volumen de los cilindros, el aumento es un medio de incrementar la potencia y el esfuerzo de tracción en el gancho. Por este motivo, se ha empezado a emplear el acero con el 2,5 ó 3 por 100 de níquel, utilizado por primera vez en 1926 por la Red Nacional Canadiense, y cuya resistencia es de 50 Kg./mm.², en vez de los 40 Kg./mm.² del acero ordinario, con un alargamiento igual al de este último. En comparación con el acero ordinario de 50 kilogramos por milímetro cuadrado, el acero al níquel de la misma resistencia tiene cualidades superiores para las altas temperaturas y se trabaja más fácilmente.

Escape. — El escape es el órgano esencial que permite aumentar la combustión en la parrilla, y con este objeto los progresos han sido particularmente muy sensibles.

Con el escape Klychap doble, establecido en la Red de P. O. en las locomotoras transformadas del tipo 231-700, de 1929, se redujo a la mitad o al tercio, según la marcha, la contrapresión necesaria para el tiro. El aumento de potencia ha sido de 300 caballos en las grandes potencias.

Existen en Francia otros escapes con las grandes secciones de pasos necesarias, que proporcionan aumentos de potencia del mismo orden.

El modelo P. L. M. en cruz es un escape igualmente doble, donde el chorro es dividido por una cruz, que reemplaza el trébol anterior. Se ha establecido sobre el tipo regulable para tener en cuenta las variables calidades del carbón y las costumbres del personal.

El tipo Lemaitre, de la Compañía del Norte, está compuesto de seis toberas, cinco rodeando a una central de sección variable, con una válvula móvil que permite obtener esta última tobera parcial o totalmente.

Todos estos escapes, perfeccionados, de gran sección, de los que hay gran variedad, han permitido obtener calderas con una marcha de combustión difícilmente alcanzada hasta ahora. Se ha podido quemar más de 1 000 Kg./m.² sobre la parrilla de 3,76 metros cuadrados de las máquinas del tipo 240 P. O. y alcanzar 900 Kg./m.² en las parrillas de 4,300 m.² de las locomotoras Pacific, y obtener corrientemente, en calderas existentes, una producción horaria de 20 000 kilogramos de vapor.

En cuanto a la vaporización, se ha alcanzado 100 kilogramos de vapor por metro cuadrado de superfi-

cie de calefacción. Prácticamente, las máquinas francesas llegan a funcionar al tipo de 75 Kg. Esta cifra, que es todavía muy elevada, no presenta inconvenientes con los hogares de acero soldados y con tubos soldados que se usan ahora en los ferrocarriles franceses. Con respecto a éstos, y sin querer tratar aquí la cuestión, frecuentemente discutida, de las ventajas respectivas de los hogares de acero y cobre, diremos solamente que los hogares de acero parece que se imponen sin disputa en las calderas de timbre elevado, es decir, de 20 Kg./cm.² y más.

Circuitos de vapor. — Las locomotoras francesas son, en general, desde hace mucho tiempo, del tipo Compound de cuatro cilindros. Antes de indicar la considerable mejora introducida en las locomotoras Compound por la modificación del circuito de vapor realizado en 1929 en la Red París-Orleans, que han aumentado el favor que se dispensa a este tipo de máquinas, indicaremos que las experiencias hechas en 1923 habían demostrado, que, aun con las Compound anteriores a 1929, la doble expansión ocasionaba una economía importante y cierta.

Las experiencias citadas fueron las siguientes: poco después de 1918, la Red de P. O. había hecho un pedido a América de cierto número de locomotoras Pacific (serie 3 600) del tipo de simple expansión. Por su parte, la red del Estado había construido en Francia un lote de máquinas Mikado (serie 141 001 a 250), igualmente de simple expansión. Como la Compañía P. L. M. poseía máquinas Compound de dimensiones y potencia análoga (231-D y 141-C), las tres redes convinieron, en 1923, poner en servicio prolongado durante cinco o seis meses, en los mismos depósitos, las máquinas a comparar.

La economía de combustible a favor de las Pacific Compound ha variado, según los meses, entre:

21 y 27 por 100 en P. L. M.
12 a 16 por 100 en P. O.

La economía de combustible registrada a favor de las Mikado Compound varió, según los meses, entre:

14 y 20 por 100 en P. L. M.
4 y 14 por 100 en la red del Estado.

Sin querer discutir aquí algunas cuestiones, que podrían explicar en parte las diferencias encontradas entre las máquinas, indicaremos que estos resultados eran suficientemente claros para confirmar las ventajas del sistema Compound y justificar la conveniencia de continuar utilizándolo. Aparte de la economía, la locomotora Compound de cuatro cilindros presenta una mayor suavidad de rodadura y está mejor equilibrada.

La máquina Compound iba a ser aún perfeccionada en 1929, por los trabajos de que vamos a tratar.

Como consecuencia de los resultados obtenidos por la Red de París-Orleáns con las locomotoras 231-700, estudiadas bajo la dirección de M. Chapelón, se consideró de interés primordial incrementar la sección de paso de vapor en los conductos y cilindros. La sección de los conductos de vapor, que eran antes de 1/10 de la sección del cilindro, se ha duplicado ahora, igualándola a 1/5 de la del cilindro. El volumen de las cajas de distribución se ha igualado también al de los cilindros, con el fin de evitar oscilaciones de presión.

El resultado fué que la presión en el depósito intermedio pudo ser aumentada de 2 Kg. próximamente a 6 Kg., y que los cilindros de baja presión producen casi tanto trabajo como los cilindros de alta presión. El habitual inconveniente que se les atribuye a las locomotoras Compound de tener los cilindros de baja presión inútiles, porque no proporciona trabajo, no puede ser invocado.

Nuevas distribuciones. — La realización de secciones de paso muy grande, necesarias en las máquinas de gran velocidad de rotación, se ha obtenido en los distribuidores especiales.

Las distribuciones de válvulas (sistema Dabeg) o de válvulas émbolos (sistema Cossart), son los perfeccionamientos que más provecho han ocasionado; se utilizan las válvulas: o en todos los cilindros de las máquinas, o sólo en los de baja presión, donde las grandes secciones son más difíciles de realizar. En Francia hay 335 locomotoras provistas de distribución de válvulas. Se emplean igualmente las correderas de doble admisión y de doble escape, que no exigen para su entretenimiento una mano de obra tan experta como las válvulas.

Uno de los modelos de correderas especiales es la Willoteaux, que se emplea con los cilindros modernos; la tienen instalada numerosas locomotoras Pacific del Oeste y del Suroeste, y ha sido adoptada por las nuevas máquinas Mikado tipo 141-P, que van a ser construidas.

Otro modelo análogo es la corredera tipo Este, que se adapta a los cilindros antiguos existentes, y ha permitido mejorar fácilmente las máquinas rápidas de la Región Este. Se ha emprendido la aplicación de esta corredera al mismo tiempo que un nuevo escape, en 680 máquinas 141-C de la Región Sureste, cuya potencia fué así elevada de 1 400 a 2 000 CV., lo que constituyó una mejora considerable.

Estas válvulas y correderas especiales se emplean en general con mando clásico de la distribución Walschaerts. Se ha reconocido, en efecto, después de diversas comparaciones, que la distribución Walschaerts era necesaria para obtener la máxima economía.

Carga mecánica. — La carga mecánica del carbón, muy extendida en las calderas fijas, se está introduciendo en los hogares de las locomotoras americanas

desde 1900, y se ha generalizado a partir de 1922. Aunque en Francia no existen tan grandes superficies de parrillas como en los Estados Unidos, las ventajas de la carga mecánica, por lo que facilita la conducción, por la posibilidad de efectuar largos recorridos y utilizar combustibles de mediana calidad, son suficientes para que su empleo sea muy interesante. Los primeros ensayos en Francia, en la Región Norte, se remontan a 1931, y hoy día existe un cierto número de máquinas que tienen instalada la carga mecánica, y las máquinas futuras también la tendrán, si las circunstancias económicas lo permiten.

Accesorios diversos, engrase y alimentación. — No queremos terminar esta enumeración de perfeccionamientos introducidos en las locomotoras de vapor sin mencionar dos detalles que tienen gran importancia para la buena conservación de las mismas.

Nos referimos en primer lugar al engrase:

La máquina de 1910 era engrasada por un aparato llamado de condensación, de gasto irregular, de cuatro o seis salidas, y por engrasadores diseminados por toda la máquina. La locomotora de 1940 posee un engrase central a presión, mediante engrasadores mecánicos, de 36 salidas, susceptibles de ejercer una presión de 120 Kg./cm.², que envían la grasa hacia todos los puntos de la máquina y se introduce incluso en los cojinetes más cargados. La locomotora ha seguido, en este aspecto, los mismos progresos que el automóvil. Un ejemplo de la importancia del engrase lo proporcionan las locomotoras aerodinámicas 231-B de la Región Sureste, que han circulado durante los años 1937-1938 entre París y Marsella, a la velocidad media de 98 Km./h., en 863 Km. de recorrido, y han podido asegurar el servicio sin incidentes, aunque las locomotoras eran antiguas máquinas del año 1905, mejoradas sin embargo, desde el punto de vista del engrase.

También citaremos el agua de alimentación. La necesidad de depurar el agua de una manera completa es hoy reconocida. Se impone aún más desde que se han generalizado los hogares de acero. En el equipo de las locomotoras actuales, el cuidado de la alimentación se ha traducido en el empleo de sistemas que obligan a que el agua llegue a la parte alta de la caldera, sobre palastros especiales dispuestos en el vapor, y por el empleo de desagües que permitan vaciar en marcha, sobre la vía, una parte del agua de la caldera cuando es demasiado rica en sales.

Desarrollo que es posible prever.

La locomotora de vapor, que ha alcanzado una gran potencia en relación con su masa, y que desde hace mucho tiempo ha dado pruebas de su aptitud para las grandes velocidades, ¿se perfeccionará más aún?

A esta pregunta se puede responder afirmativamente: en primer lugar, porque la locomotora aprovecha y acabará por utilizar un día u otro todos los perfeccionamientos diversos creados por la industria, como se ha visto para la carga mecánica, los rodamientos de rodillos, las válvulas, etc..., y, como quizá se vea, para la turbina, la condensación..., lo que hará que su desarrollo siga al de las otras industrias; y después, también porque la locomotora de vapor actual tiene todavía necesidad de mejorarse. Si la locomotora proporciona hoy una gran potencia con un rendimiento satisfactorio, continúa siendo todavía una máquina que necesita, por la utilización intensa a que está sometida, gastos de conservación bastante elevados y una vigilancia constante. Ateniéndonos a la locomotora clásica, es cierto que, sin modificarla profundamente, hay todavía progresos que realizar en la robustez de sus órganos, tratando de obtener un mayor margen entre su máxima potencia prácticamente utilizada. Nuestras máquinas dan lugar todavía, con demasiada frecuencia, a recalentamientos de las cajas de grasa, a reparaciones de las calderas y a interrupciones en el recorrido, que demuestra lo interesante que sería tener locomotoras que pudieran utilizarse menos cerca de su límite.

Esta fué la idea que presidió en las mejoras introducidas en la locomotora mixta Mikado, de la que se ha establecido, a partir del tipo 141-C Sureste, el tipo 141-P, cuya construcción está emprendida.

Por estas razones, y para conseguir máquinas robustas, de gran superficie de parrillas, dando una combustión reducida, creemos que, en el porvenir, la construcción de las máquinas potentes se orientará hacia los tipos de dos ejes libres atrás, que permitan, sin sobrepasar los pesos unitarios actualmente presentes, una superficie de parrillas grande, de 5,50 m.² por lo menos, y un bastidor más rígido.

En este sentido, en el que los países extranjeros se han internado ya, principalmente los Estados Unidos y Alemania, un paso se acaba de dar en Francia con las locomotoras 232-R y 232-S de la Región Norte, que tienen parrillas de 5,20 m.², chasis de barras y cilindros de acero moldeado, máquinas muy modernas, que no figuran en las descripciones dadas anteriormente, porque aun se encuentran en período de perfeccionamiento, pero que parece deben dar resultados interesantes.

En lugar de las máquinas 231, 241, 251..., con las que están familiarizados en Francia, aparecían los tipos 232, 242, 252... Sería posible dotar a este conjunto, a esta familia de máquinas nuevas, de órganos normales comunes en gran número, lo que respondería al objeto perseguido de la economía y comodidad de conservación.

Añadamos que la construcción de estas máquinas podrá quizá ser modificada, reemplazando los cuatro cilindros Compound actuales, cuya acumulación alcan-

za el límite admisible en las locomotoras potentes, por tres cilindros igualmente Compound, dando una mayor simplicidad a la construcción, conservando la economía de la doble expansión. En cuanto al bastidor, se puede esperar que la construcción de acero moldeado, en una o varias piezas soldadas, permitirá obtener, a ejemplo de la construcción americana, bastidores robustos, suprimiendo numerosos ensambles de piezas remachadas y roblonadas. Los progresos en este sentido no servirán solamente para la máquina de vapor, sino para todo el material móvil, y en particular a las locomotoras eléctricas, cuya construcción está llamada a desarrollarse.

Para complemento de este estudio era inexcusable referirse a los trabajos de M. Chan, Ingeniero Jefe de la División de Locomotoras de la Société Nationale de Chemins de Fer de France, de quien hemos tomado los anteriores datos. Ellos complementan nuestro estudio hasta 1940. (Véase *R. de F. y T.*, marzo 1942.)

* * *

Recientemente (1943) en los Estados Unidos se ha estudiado nuevamente esta cuestión (*Revista de F. C. y T.*, junio 1943).

Aunque las locomotoras de otros sistemas se han desarrollado mucho en los últimos años, también el progreso reciente de las locomotoras de vapor ha sido considerable, y las máquinas actuales son muy distintas de las que se construían hace veinte años. La potencia desarrollada en llanta es del orden de 3 800 CV. en las máquinas de tres ejes acoplados, 4 500 CV. en las de cuatro ejes y 5 500 CV. en las de cinco. Las locomotoras articuladas de seis y ocho ejes proporcionan potencias hasta de 6 000 CV. Con potencias de orden tan elevado, la actual locomotora de vapor puede ser considerada como un medio potente y eficaz para el transporte rápido de viajeros y para el tráfico de mercancías. Por otra parte, la locomotora de turbinas presenta características prometedoras. Se construyen actualmente turbinas con un peso específico de menos de medio kilogramo por caballo, ligereza igual a la obtenida para los motores de aviación, y aun teniendo en cuenta las transmisiones y piezas accesorias, el peso no excede de 3,2 kilogramos por caballo, que es mucho menor que el de cualquier otro sistema productor de energía. Es de esperar que la locomotora de turbinas pueda desarrollar, a velocidades elevadas, una potencia superior en un 20 ó 25 por 100 a la de las locomotoras corrientes, a igualdad de la cantidad de vapor consumido.

* * *

En resumen: la locomotora de vapor, el automotor de vapor, la pequeña locomotora de vapor, tiene aún un vastísimo campo de aplicación, y sus posibilidades

están lejos de agotarse. Por lo tanto, se procederá muy ligeramente, si al estudiar la electrificación ferroviaria de un país, al estudiar también la reorganización de su tráfico, y hasta la competencia y coordinación de los transportes ferroviarios con los de la carretera, no se tienen presentes las elevadas potencias, rendimientos, pesos específicos, velocidades, etc.; en suma: las grandes posibilidades que todavía concurren en la locomotora de vapor.

Bibliografía.

Railway Age, enero 1939, y *B. A. I. Ch. F.*, abril 1939.

B. A. I. Ch. F., agosto 1939.

Entre otros trabajos citados son notables y recientes los siguientes:

A. PARMENTIER: *Revue Générale des Chemins de Fer*, segundo semestre 1935.—Idem: *B. A. I. Ch. F.*, septiembre 1938.—A. LANDROG: *B. A. I. Ch. F.*, abril 1938.—H. NORDMANN: *B. A. I. Ch. F.*, noviembre 1938.—N. GRESLEY: *Modern Transport*, 1936, núm. 920.—H. NORDMANN: *Glassers Runalen*, 1935.—Idem: *Verkehrstodische Woche*, 1936.—H. NORDMANN: *G. A.*, 1937. Vol. 121.—M. A. MASCINI: *B. A. I. Ch. F.*, febrero 1937.—A. PARMENTIER y R. DUGAS: *B. A. I. Ch. F.*, febrero 1937.—H. N. GRESLEY: *B. A. I. Ch. F.*, abril 1937 y junio 1937.—H. MARTIN: *B. A. I. Ch. F.*, julio 1938.—M. CHAN: *Revue Générale des Chemins de Fer* (I-1942).