SECCIÓN TÉCNICA

La Electrificación del Ferrocarril Paulista en Brasil

por el ingeniero

L. CANTANHEDE DE C. ALMEIDA

Profesor de la Escuela Politécnica de Río Janeiro

(Conferencia dada en el Instituto de Ingenieros el 9 de Enero de 1925)

El prolongado período económico por que atravesó el mundo, comprendido entre los años 1870 y 1914, se caracterizó por la estabilidad de los precios de los artículos de consumo mundial, los cuales desempeñan el rol de guías o patrones para apreciar el costo de la vida. Entre estos artículos de consumo, de gran importancia, figura el carbón de piedra, cuyo consumo se ha incrementado considerablemente con el desenvolvimiento de la industria mecánica y de los transportes marítimos y terrestres.

Las estadísticas del consumo de carbón han sido un índice del progreso de un país, y quienquiera que observe los precios de este combustible durante un largo período, puede constatar la constancia de ellos. Representando gráficamente dichos precios se tendrán líneas rectas casi horizontales.

Después del año 1914 los costos de producción experimentaron una transformación. El magnífico rendimiento de las minas de carbón europeas y americanas que permitió hasta esa fecha la estabilidad y conservación del precio del carbón, no fué suficiente para equilibrar la elevación de los salarios, agravados desde el punto de vista económico por las nuevas exigencias sociales de asistencia al obrero.

Debido a la alza exagerada del precio del combustible y al crecimiento del tráfico que en los países nuevos como el Brasil oscila de un año para otro entre 5 % y 10%, los administradores de ferrocarriles se han visto obligados a economizar combustible para poder mantener la vida económica de sus empresas. La solución más acertada para el objeto en los países donde existen grandes instalaciones hi-

dro-eléctricas, o al menos, grandes caídas de agua aprovechables, es la tracción eléctrica.

En la América del Norte el espíritu progresista de sus habitantes se convenció rápidamente de la urgencia del problema de la electrificación de las vías férreas, y en el lapso de 1908 a 1919 fueron electrificados más de 3 000 kilómetros de vías explotadas a vapor y más de 3 000 kilómetros de nuevas líneas construídas desde sus comienzos para funcionar eléctricamente.

En los últimos años, no obstante la elevación de los precios de las máquinas y salarios, la electrificación de las vías férreas norteamericanas continúa con toda actividad. En Europa el problema también ha sido considerado con gran interés, de tal modo que en los últimos 5 años se electrificaron más kilómetros que en los 20 años anteriores, estando en la actualidad en estudio y en vías de transformación grandes redes nacionales, como la francesa, cuya rapidez para efectuar los trabajos es excepcional dentro de los métodos administrativos europeos.

En Brasil el problema del combustible ha merecido siempre la atención de los administradores y aun antes de 1914 ya se habían hecho estudios para la electrificación de la sección inicial del Ferrocarril Central del Brasil, en los suburbios de Río Janeiro, que tiene un tráfico anual de más de 30 000 000 de pasajeros. Los mismos estudios se habían efectuado también para otras vías férreas.

El alza del precio del carbón de piedra ya había obligado a las empresas ferroviarias a sustituir, en parte, este combustible por leña extraída de las zonas inmediatas a sus trazados. El Ferrocarril Paulista, que recorre el progresista Estado de S. Paulo por medio de 1 245 kilómetros de líneas, reemplazó gradualmente el empleo de carbón importado por leña, y en el año 1917 quemó exclusivamente leña en los fogones de sus locomotoras después de haberlos adaptado para esta clase de combustible.

El cuadro que sigue muestra el crecimiento de los gastos de explotación de este ferrocarril debido al desarrollo del tráfico y principalmente con la elevación del precio del combustible que alcanzaba al 11,3% del costo total en 1907 y que se incrementó a 22,8% y 22,9% en 1912 y 1913. En esa época se generalizó el empleo de leña, aumentando por esta causa su consumo y el porcentaje del gasto en combustible bajó en 1915 a 18,2%, pero siempre persistió la tendencia a subir por causa de que las plantaciones que proporcionaban la leña fueron escaseando en las inmediaciones de la línea.

AÑOS	Gastos totales de explotación en contos de reis	COMBUSTIBLE					Relación en por ciento de los gastos en combustible con los totales
		CARBON		LEÑA		TOTAL	
		Toneladas	Contos de reis	Metros cúbicos	Contos de reis	Contos de reis	
1907	9.792	8.087	326	287.614	775	1.101	11,3
1908	9.968	5.667	251	300.814	833	1.084	10,9
1909	11.686	6.708	217	386.088	897	1.114	9,5
1910	10.125	10.372	373	350.499	1.034	1.407	13,9
1911	11.341	17.223	676	338.638	997	1.673	14,8
1912	13.662	47.410	2.170	280.599	938	3.108	22,8
1913	16.408	75.373	2.987	231.637	775	3.762	22,9
1914	12.992	23.308	835	483.088	1.614	2.449	18,9
1915	13.133	2.662	105	679.811	2.290	2.395	18,2
1916	14.950	1.454	49	807.760	2.889	2.938	19,7
1917	15.135	524	10	916.356	3.285	3.295	21,8
1918	17.817	....	..	1.058.016	3.822	3.822	21,5
1919	20.840	....	..	1.100.000	4.821	4.821	23,1
1920	28.475	....	..	1.302.451	8.658	8.658	30,4

Observ. Con el cambio actual 1.000 reis equivalen a $ 1.00 m|c.; 1 conto = $ 1000 m|c.

En 1916, el Directorio del Ferrocarril Paulista, impulsado por el ingeniero civil brasileño, Francisco de Monlevade, Ingeniero Jefe y Administrador del ferrocarril, resolvió estudiar definitivamente la cuestión del reemplazo de la tracción a vapor por tracción eléctrica, en la sección principal de su trazado, o sea, la línea tronco que va de Jundiahy a Campinas. Esta sección es de 45 kilómetros de longitud, de doble vía y posee un movimiento diario de 36 trenes de carga y pasajeros. La trocha es de 1,60 m. utilizándose la total capacidad de tracción de las locomotoras en servicio. El servicio de este ferrocarril pasa por ser uno de los mejores organizados en Brasil, empleándose locomotoras de carga de 18 000 Kg. de esfuerzo de tracción y de pasajeros de 14 700 Kg., con 290 metros cuadrados de superficie de calefacción.

El estudio llevado a cabo previamente en Brasil con toda minuciosidad y después continuado en el extranjero durante algunos años por el gran ingeniero Monlevade, quien observó en cada país la naturaleza de las instalaciones en explotación y su comparación con las características del ferrocarril Paulista, llevó al convencimiento a la administración de la empresa de efectuar inmediatamente la electri-

ficación de la sección más importante de su línea principal en una distancia de 45 kilómetros. Se adoptó el sistema de línea aérea en forma de catenaria con corriente continua de tres mil volts. Para el suministro de energía la compañía Paulista firmó un contrato a largo plazo con la gran Empresa de Fuerza y Luz de S. Paulo al precio de 40 reis (al cambio actual 1 000 reis valen 6 d.) el kilowatt hora, medido en el primario de la subestación transformadora. Se dispuso una línea de transmisión de alta tensión con un desarrollo de 16 kilómetros en dos circuitos a cargo de la Compañía Paulista de Ferrocarriles.

El costo de la instalación fué estimado en 3 500 000 dólares. En 1920 fué colocada la orden para el material e iniciada la obra de construcción utilizando postes de madera tanto para la línea de transmisión como para toda la línea de suspensión del trolley. Para los postes la compañía utilizó en gran parte madera de eucaliptus proveniente de plantaciones artificiales de su propiedad, cuyos árboles fueron plantados en el año 1900 con el fin especial de tener provisión de durmientes más tarde.

La explotación de estas forestas ha sido hecha para obtener postes y durmientes para la línea.

Calculando con toda seguridad que un kilowatt recibido en el primario corresponde a dos kilogramos de carbón quemados en el fogón de las locomotoras y que el consumo anual de 250 000 metros cúbicos de leña en la sección considerada equivale a un consumo de 30 000 toneladas de carbón, el ingeniero Monlevade confeccionó el cuadro comparativo para un período de diez años. En este cuadro figura el gasto probable de carbón y de energía eléctrica, admitiendo que el carbón importe $ 70 000 la tonelada o sea, £ 1.15.00, hipótesis favorable que posiblemente no se obtendrá más para el Brasil.

AÑOS	CARBON		Energía eléctrica en el primario de la sub-estación	
	Toneladas	Contos de reis	Kw.	Contos de reis
1917	30 000	2 100	15 000 000	600
1918	32 400	2 268	16 200 000	648
1919	34 800	2 436	17 400 000	696
1920	37 200	2 604	18 600 000	744
1921	39 600	2 772	19 800 000	792
1922	42 000	2 940	21 000 000	840
1923	44 400	3 108	22 200 000	888
1924	46 800	3 276	23 400 000	936
1925	49 200	3 444	24 600 000	984
1926	51 600	3 612	25 800 000	1 032

Admitiendo el gasto de doscientos contos de reis anualmente (£ 5 000 al cambio de 6 d.) correspondientes a las líneas de transmisión y de contacto y estaciones transformadoras, se hizo el cuadro que sigue a continuación, que establece la comparación del empleo de combustible y de energía eléctrica en los 45 kilómetros de la línea principal:

AÑOS	Costo del combustible en el ténder de la locomotora	Costo de la energía eléctrica en el kilo de contacto	Economía resultante.
1917	2.100:000	$ 000 800:000	$ 000 1.300:000 $ 000
1918	2.268:000	000 848:000	000 1.420:000 000
1919	2.436:000	000 896:000	000 1.540:000 000
1920	2.604:000	000 944:000	000 1.660:000 000
1921	2.772:000	000 992:000	000 1.780:000 000
1922	2.940:000	000 1.040:000	000 1.900:000 000
1923	3.108:000	000 1.088:000	000 2.020:000 000
1924	3.276:000	000 1.136:000	000 2.140:000 000
1925	3.444:000	000 1.184:000	000 2.260:000 000
1926	3.612:000	000 1.232:000	000 2.380:000 000

Todo indicaba las grandes ventajas económicas de la electrificación que introducía una economía inmediata, en 1923 a 1924, de £ 50 000, que justificaba el capital de £ 750 000 que requería la electrificación, además de dejar aumentada la capacidad de la línea para un gran incremento del tráfico, pudiéndose al mismo tiempo, emplear el material de tracción a vapor retirado en otras secciones del ferrocarril para las cuales era indispensable adquirir nuevas unidades de tracción. Tomando en consideración en el costo de la electrificación el precio de las locomotoras a vapor, en buen estado, que fueran aprovechables para las otras secciones y que ahora costarían lo menos 1½ millones de dólares, se ve que la remuneración del capital necesario para la electrificación era superior al 10%, sin tomar en cuenta, por otra parte, las ventajas indirectas de dicha electrificación.

El material de transporte adquirido se compone de 6 locomotoras para trenes de pasajeros y 10 locomotoras de carga. Se encargó también el material completo para las líneas de transmisión y de contacto y todas las instalaciones necesarias a una de las estaciones de transformación, la de Louveira, en el kilómetro 15 de la sección que se iba a electrificar.

La sub-estación de Louveira recibe la corriente a 80 000 volts, 60 ciclos y la

transforma en corriente continua de 3 000 volts para la alimentación de la línea de contacto, por medio de tres grupos de 1 500 Kw. cada uno, dos para el funcionamiento regular y uno de reserva. Las locomotoras de carga y de pasajeros, proporcionadas por la General Electric Company de Estados Unidos, tienen las siguientes características principales:

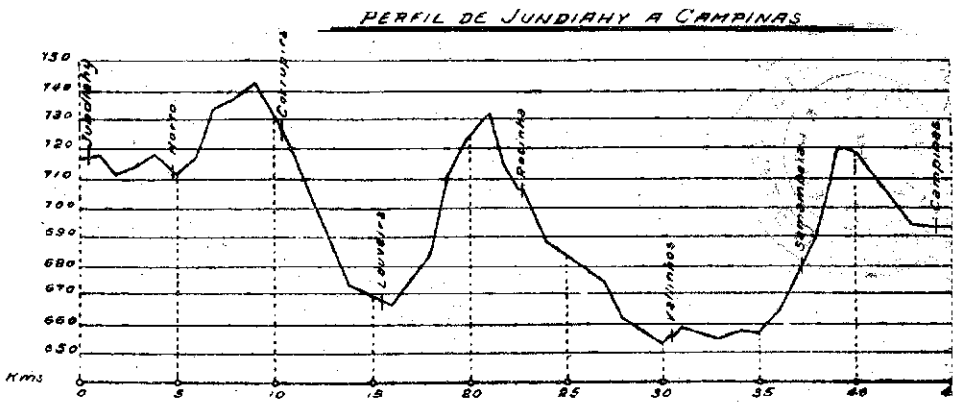
	Carga	Pasajeros
Longitud total	11,94 m.	16,76 m.
Ancho	3,08 »	3,08 »
Altura total (toma-corriente cerrado)	4,34 »	4,34 »
Base total	8,13 »	14,02 »
Base rígida	2,64 »	2,36 »
Peso total adherente	90 ton.	108 ton.
Peso por eje motor	22,7 »	18 »
Diámetro de las ruedas motrices	1,67 m.	1,67 m.
Número de motores por locomotora	4	4
Potencia por motor	400 HP.	400 HP.
Velocidad de régimen	34 Km|hora	66,4 Km|hora
Velocidad máxima de seguridad	50 »	90 »
Esfuerzo de tracción a potencia contínua	13 000 Kg.	6 700 Kg.

Las locomotoras fueron provistas de frenos de recuperación de corriente en las pendientes y con un sistema combinado de frenos de aire comprimido para la locomotora y de vacío para el tren por causa del empleo de carros con ambos sistemas de frenos.

Al estudiar los fabricantes las especificaciones de las locomotoras eléctricas, opinaron considerando el perfil de la sección de vía en estudio no consultar frenos de recuperación, toda vez que en el ferrocarril Chicago Milwaukee la economía total de energía alcanzaba sólo a un 11%. La Dirección del ferrocarril Paulista mantuvo en sus especificaciones los frenos de recuperación de energía con resultados ventajosísimos, como se verá.

La inspección del perfil de la línea muestra la razón que asistía a Monlevade y que la experiencia ha ratificado.

Concluída la exposición resumida de la justificación de la iniciativa adoptada en buena hora en S. Paulo y la descripción sucinta de los procedimientos y meca-



nismos adoptados en el proyecto, pasaremos a exponer los resultados del primer año de explotación, que son de interés por tratarse de la electrificación completa de los servicios de carga y pasajeros de una vía férrea de gran movimiento, cuyos buenos resultados han aconsejado la prosecución de su transformación, no obstante las condiciones adversas del cambio en el Brasil.

Durante el año transcurrido desde Junio de 1922, fecha de su inauguración, hasta Junio de 1923, a pesar de ser el primer año de un servicio nuevo en el país, se pusieron en evidencia sus ventajas, excediendo a las expectativas más optimistas, tanto desde el punto de vista técnico como del económico.

El tráfico en la sección electrificada alcanzó en el primer año a 750 000 trenes-kilómetros. Los principales datos de este estudio los hemos deducido en la oficina del ingeniero Monlevade donde verificamos los resultados de la comparación entre tracción a vapor y eléctrica. Estos datos se refieren al tren-kilómetro.

En lo referente a la tracción se vieron inmediatamente todas las ventajas. En la época de la inauguración no eran menos de 36 trenes diarios, más bien 38 trenes que exigían el empleo de 12 locomotoras a vapor fuera de 3 de reserva y en reparación. El servicio eléctrico comenzó con 20 trenes de pasajeros y 22 de carga, y no obstante el incremento del tráfico se vió que 8 locomotoras eléctricas efectuaban mayor servicio que las 12 a vapor, a causa de que la maniobra final de virar y abastecer de carbón y agua era para las locomotoras a vapor de 30 minutos y de sólo 5 a 6 minutos para las eléctricas. Esta economía de tiempo que da a la locomotora eléctrica un efecto útil superior en 30% al de la locomotora a vapor, el cual es aun mayor debido a la velocidad más alta desarrollada por las primeras, la cual alcanza a 30 Km|hora en el perfil de la línea ya mostrado, arrastrando trenes de 600 toneladas en gradientes de 1,8 y 2%.

En los doce meses considerados, el consumo de energía fué de 9 600 000 Kw. H, equivalente a lo menos a 20 000 ton. de carbón, costando la energía eléctrica 467:411 $ 000, incluyendo el gasto de transformación de 70:080 $ 000. Si se tuviese, pues, carbón como combustible, el gasto correspondiente no habría sido menos de 2 000 000 $ 000.

Ha resultado una economía por este capítulo de 1 530 000 $ 000 o sea al cambio actual del Brasil, de £ 38 250. Se ha observado que la recuperación ha permitido obtener una economía media de 12% de energía en los trenes de pasajeros y 24% en los de carga.

El cuadro que sigue muestra los resultados comparativos obtenidos para los dos tipos de tracción.

Arrastre de trenes (tracción a vapor en 750 000 trenes-kilómetro)

Carbón 20 000 ton	2.000:000	$ 000	Por	T. K.	2$667
Maquinistas y fogoneros	250:000	000	»	»	333
Mecánicos y ayudantes casa de máquinas	111:111	000	»	»	148
Limpiadores de locomotoras	22:500	000	»	»	030
Lubricantes y materiales diversos	84:750	000	»	»	113
TOTAL	2.468:250	$ 000	»	»	3$291

Arrastre de trenes (tracción eléctrica en 750 000 trenes-kilómetro)

Energía en el primario	398:000	$ 000	Por	T. K.	$531
Transformación de energía	70:080	000	»	»	094
Maquinistas y ayudantes	159:803	000	»	»	213
Electricistas y mecánicos en los depósitos	24:618	000	»	»	033
Limpiadores de locomotoras	13:780	000	»	»	018
Lubricantes y materiales diversos	89:100	000	»	»	118
TOTAL	755:381	$ 000	»	»	1$007

De este cuadro se deduce que el gasto originado por tren-kilómetro en la tracción eléctrica fué 10 $ 070 o sean 6 ds. y que el mismo tren-kilómetro con tracción a vapor habría costado $ 3 291 o más de £ 0.1.6, verificándose que la tracción eléctrica costó menos de un tercio de lo que habría importado con tracción a vapor.

En lo referente a la *reparación de locomotoras*, ya la experiencia norteamericana había mostrado que las locomotoras eléctricas son más económicas que las a vapor habiéndose constatado igual resultado en el ferrocarril Paulista, a pesar del costo subido de los repuestos, acrecentados por la desvalorización de la moneda brasileña.

La estadística del ferrocarril Paulista, en que ya sus locomotoras eléctricas han recorrido más de 800 000 kilómetros, presenta la siguiente comparación, enteramente favorable a la locomotora eléctrica. Ella demuestra que los gastos de reparación significan más de 2|3 de economía con tracción eléctrica que con vapor:

Tracción a vapor (750 000 trenes-kilómetro)

Mano de obra	113:500 $ 000	Por T. K. $	151
Materiales diversos	153:750 000	» »	205
TOTAL	267:750 $ 000	» »	$ 356

Tracción eléctrica (750 000 trenes-kilómetro)

Mano de obra	52:500 $ 000	Por T. K. $	070
Materiales diversos	33:500 $ 000	» »	044
TOTAL	85:500 $ 000	» »	$ 114

La economía total fué por tanto de 181:750 $ 000 o sean £ 4 544 en un año.

No ha existido ningún accidente grave en las reparaciones, no obstante la poca práctica del personal. Solamente 5 motores de tracción fueron reparados en los propios talleres del ferrocarril Paulista. En cuanto a la parte mecánica de las locomotoras, las reparaciones fueron también de poca consideración.

Ha sido muy bien observada la rapidez con que se ejecutan las reparaciones normales sustituyéndose el material eléctrico rápidamente por sus repuestos. Así ninguna locomotora permaneció en los talleres más de ocho días.

Las líneas eléctricas comprenden la línea de transmisión de 16 kilómetros y la de contacto de 115 kilómetros de desarrollo total, incluyendo desvíos. Estas líneas funcionan perfectamente con un gasto de conservación sumamente bajo que demuestra que los gastos por tren-kilómetro correspondientes a esa canalización, fueron apenas de 78 reis por año.

El personal ocupado en la conservación de la línea fué muy reducido, compuesto de 2 capataces y 6 hombres para la línea de transmisión y de un capatazgeneral 3 capataces y 9 hombres para la línea de contacto.

Los gastos relativos a las canalizaciones eléctricas, fueron detalladamente las siguientes:

Línea de transmisión (16 kilómetros en 2 circuitos)

Personal	15:665 $ 560	Por Km.	979$097
Material	2:289 $ 110	» »	143$069
TOTAL	17:954 $ 670		1:122$166

Línea de contacto (115 kilómetros)

Personal	35:879 $ 650	Por Km.	311$997
Material	4:699 $ 600		40$866
TOTAL	40:579 $ 250		352$863

Resumiendo en un cuadro único los datos que corresponden detalladamente a cada una de las partidas estudiadas, se puede establecer la siguiente comparación entre ambos sistemas de tracción, de acuerdo con los datos experimentales de la Compañía Paulista deducidos de un año de observación relativos a 750 000 trenes-kilómetros.

Comparación general

	Tracción a vapor	*Tracción eléctrica*
Arrastre de trenes	2:468:250 $ 000	754:712$000
Reparación de locomotoras	267:250 $ 000	85:500$000
Líneas eléctricas	——	58:533$000
	2:735:500$000	898:745$920
Costo del tren-kilómetro	3 $ 647	1$198

La diferencia a favor de la tracción eléctrica a la suma de 1.836:754$080 o sean

cerca de £ 46 000 y calculándose el precio del carbón, para la comparación, en 100$000 igual £ 2.10.00, precio muy inferior al que realmente vale en el presente año en el Brasil incluídas las pérdidas en los fogones.

El capital empleado en las instalaciones a que nos referimos representa una parte que no corresponde únicamente al trozo en cuestión. No obstante que la estación de transformación y líneas de contacto son exclusivamente para esa sección, la línea transmisión servirá otros trechos, habiéndose adquirido por otra parte las locomotoras para servir la tracción de una mayor longitud de 50 kilómetros que serán electrificados sin adquirir una sola locomotora más. Fuera de lo expuesto, las locomotoras eléctricas en servicio han evitado la adquisición de 15 grandes locomotoras modernas a vapor que no habrían costado menos de un millón de dólares.

Estudiados los diversos aspectos variables en un país tal como el Brasil, sujeto desgraciadamente, a fuertes variaciones de su moneda, puede la Dirección Técnica del Ferrocarril Paulista afirmar a su Directorio y a sus accionistas que la adopción de la tracción eléctrica en sus líneas en que ya se ha iniciado el servicio, deja una economía que oscila entre £ 20 000 y £ 30 000, fuera de las sumas necesarias para pagar el interés y amortización del empréstito que contrató la Compañía para realizar sus instalaciones.

Como consecuencia de esta experiencia, la Compañía decidió adoptar el siguiente programa que puede aplicarse a los ferrocarriles de los países que posean energía hidroeléctrica fácil de utilizar. "No adquirir más locomotoras a vapor, procediendo a electrificar metódica y sucesivamente y sin interrupción las secciones de mayor tráfico"

El autor de este trabajo cree, en vista de los resultados obtenidos en el Ferrocarril Paulista en el Brasil, que los administradores de los ferrocarriles americanos deben prestar una atención preferente en la construcción de nuevas líneas de penetración, sobre todo en las regiones accidentadas para que ellas se hagan tomando en cuenta su futura electrificación si es que se puede disponer en la región de energía hidroeléctrica de fácil obtención.

Las ventajas de la tracción eléctrica son indiscutibles y envuelve una importantísima cuestión económica.

El mayor aumento del capital de instalación de una línea electrificada sobre el de una de vapor, es aproximadamente el que corresponde a la línea de contacto y ese mayor costo no es mayor de 30% sobre el precio de la vía y material rodante. Ese incremento no debe, por otra parte, considerarse como definitivo por cuanto

la tracción eléctrica permite el empleo de gradientes y curvas más pronunciadas que la de tracción a vapor, acortando por lo tanto el trazado de las líneas.

Los gastos de explotación son, como se ha visto, fuertemente reducidos y la principal cuestión estriba en la obtención de energía eléctrica barata cuya solución resolverá al mismo tiempo y en todas partes, un problema económico de la región.

El empleo de la energía eléctrica para las vías férreas en regiones nuevas con escasa producción, como son casi todas las de América, en que se construyen tales vías, obligará a proceder a la instalación de usinas hidroeléctricas que abastezcan las subestaciones respectivas. Dichas usinas serán grandes fomentadoras del progreso de la región por la energía eléctrica a bajo precio que pueden suministrar pues su instalación se hace contando con un gran consumo inicial. Por este motivo, los ferrocarriles en tales casos estarán habilitados para crear la producción industrial de la región, lo cual a su vez aumentará las entradas de ellos mismos.

Las reservas de carbón de piedra, forestales y de petróleo, siendo reservas, precisan ser conservadas en beneficio de la humanidad. Toda actividad debe ser dirigida a utilizar la hulla blanca que nunca se agota y se renueva en el espléndido cielo natural de su formación y transformación. Atendiendo a las valiosas razones y ejemplos expuestos, el autor recomienda que *"el estudio y construcción de nuevas vías férreas de penetración sean hechos desde el punto de vista de su electrificación siempre que en la región se disponga de caídas de agua utilizables"*.