

componente de la corriente no es la misma. En la bobina de la armadura del alternador, la potencia de la componente desviada, producto $I_d \times BF$, es mayor que la potencia de la variada $I_v \times EF$ y de sentido contrario a la $OE \times OI \times \cos \theta$, y por eso, la f. e. m. sélfica hace, en resumen, trabajo.

Medición de las constantes de reacción de armadura

Es posible que la vulgarización de métodos de cálculo poco aproximados en el problema del acoplamiento de alternadores se deba a la dificultad de la medición directa de las constantes α , λ y τ , que requeriría aparatos costosos y desusados. Pero esta medición se realiza sin tropiezos con sólo disponer de sencillas resistencias óhmicas acoplando a la máquina, cuyas constantes se desea determinar, otra auxiliar, que funciona como una reactancia sincrónica graduable con ambos signos.

Un método para practicar estas mediciones fué publicado por el autor en el fascículo noviembre-diciembre 1925 de los *Anales de la Asociación de Ingenieros del Instituto Católico de Artes e Industrias*.

En especial es poco practicada la medición del coeficiente τ . Por el método del autor se realiza acoplando la máquina en prueba, A , con otra máquina auxiliar, B , con interposición de una resistencia óhmica, R , capaz de absorber una parte alícuota pequeña ($1/5$ a $1/10$, por ejemplo) de la capacidad de potencia a plena carga, de la máquina en prueba.

Las operaciones necesarias para medir τ , suponiendo la excitación de las máquinas hecha por separado (el caso de excitatrices acopladas apenas tiene diferencia), son sucesivamente:

1.º Se elige una intensidad I , para la prueba, como pueda absorber de continuo el reóstato R , con una d. d. p. aproximada a la normal del alternador.

2.º Se determina la apertura del regulador del motor que impulsa a A , para dar la corriente I , ce-

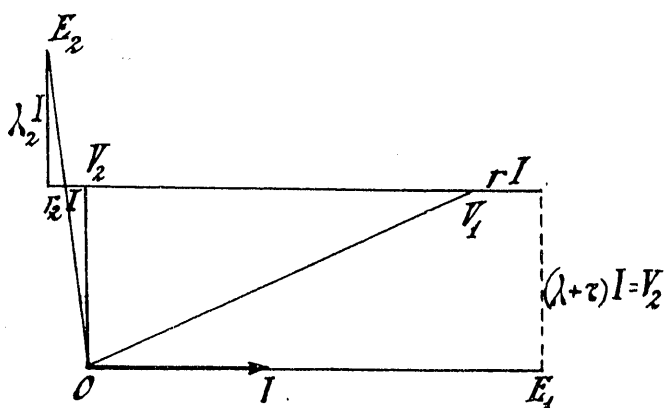
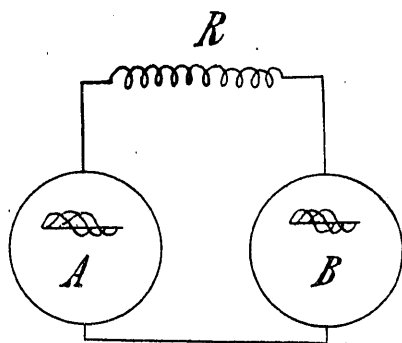
rrada esta máquina sola, sobre el reóstato R , a la velocidad de régimen ω . Sea p_1 esta apertura.

3.º Se determina también la intensidad de corriente excitatriz en A , para dar en circuito abierto la tensión $RI + rI$, siendo r la resistencia interna de la armadura de A . Sea i esta intensidad de corriente excitatriz.

4.º Se determina la apertura del regulador del motor que impulsa a B , para que esta máquina dé, en circuito corto, la intensidad I . Sea p_2 esta apertura.

5.º Se acopla ambas máquinas al través de R y manteniendo en la máquina A la excitación i , fija, se va cerrando el regulador de B , hasta p_2 , y abriendo el de A , hasta p_1 .

6.º Mientras tanto se varía la excitación de B , en sentido conveniente hasta lograr que, hallándose en sus cifras respectivas las aperturas p_1 y p_2 , la corriente cambiada sea I , con la velocidad de régimen ω .



En este punto la lectura del voltaje de B nos da el valor $(\lambda + \tau)I$. Para convencerse de ello basta mirar el diagrama siguiente: OV_2 , que es la d. d. p. de B , es perpendicular al vector de la corriente OI , porque no puede hacer trabajo alguno en el circuito exterior de la máquina B , cuyo motor tiene la apertura necesaria únicamente para el trabajo interno.

La máquina A suministra todo el trabajo sobre R ; pero la B , sobrecitada suficientemente, impone el sentido de la corriente.

El circuito externo de A , de resistencia $R + r_2$, tiene capacidad sincrónica que equilibra totalmente la inductancia $\lambda + \tau$ interna de la máquina.

Emilio AZAROLA
Ingeniero de Caminos

Anteproyecto de un plan general de electrificación de los ferrocarriles españoles

III

Llegamos al punto en que se han de aplicar cuantas conclusiones, fórmulas, resultados concretos, etc., han sido el objeto próximo de los artículos primero y segundo de este trabajo (1): «Obtención de un plan general de electrificación de los ferrocarriles españoles de interés general». Recordemos que para alcanzar las mayores condiciones de garantía y la exactitud más precisa (aunque sólo relativa, como repetidamente hemos tenido buen cuidado de hacer no-

tar), hubiera sido necesario estudiar dos partes de importancia capital:

a) Condición de mínima economía de una electrificación.

b) Ventajas técnicas de la tracción eléctrica sobre la de vapor, que se traducen casi siempre en ventajas económicas de diversas categorías, formando así, en su conjunto, las bases de una racional agrupación de líneas férreas que deben ser electrificadas.

La primera ha sido tratada en los artículos anteriores. La segunda, por su gran extensión, no ha podido ser estudiada aquí, formando la segunda parte del trabajo citado.

(1) REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, números 2 471 y 2 472, páginas 70 y 89.

La fijación de un programa de electrificación ha sido en todos los países objeto del estudio detenido de una Comisión de técnicos, como poniendo de manifiesto su verdadera trascendencia. Los trabajos que componen su labor preparatoria son casi siempre de dos distintas clases:

a) Estudio técnico del problema.

b) Estudio económico.

En la primera cabe distinguir:

1.º Elección del sistema de corriente.

2.º Elección de la tensión, dentro del tipo de electrificación elegido.

3.º Normas de unificación para el material fijo.

4.º Normas de unificación para el material móvil.

De todas estas cuestiones, y más principalmente de la elección de clase de corriente y tensión, nos hemos ocupado muy ampliamente en la segunda parte del presente trabajo, ya que en la primera habíamos partido de supuestos que era preciso justificar, a la vista del estado actual de la técnica en la electrificación de ferrocarriles. Así llegamos a la deducción que el sistema de corriente continua a 1 500 voltios es hoy en día el que se debe adoptar para una electrificación general de nuestras líneas férreas de interés nacional.

La segunda, o sea el estudio económico del problema, ha formado la parte más esencial en todo nuestro estudio, porque en realidad es actualmente la más desconocida y la que decide caso por caso si una línea debe o no electrificarse. Llegamos, como se ha visto, a la determinación práctica, expedita, de la condición de economía de una electrificación, de tal modo que, dadas las principales características del ferrocarril a electrificar, puede fácilmente determinarse la conveniencia económica de su electrificación o desecharla. Recordemos nuevamente aquí que el esfuerzo personal nuestro estará sin duda expuesto a mayores errores que si nuestras consecuencias fueran producto del trabajo de una Comisión de técnicos. Pero hemos querido dar una pauta general, de tal modo que basta comparar este procedimiento con el seguido en Francia, por ejemplo, al fijar su programa de electrificación, para deducir las ventajas de mayor precisión de nuestro estudio, de nuestro método. Bien es verdad que en los trabajos de la Comisión francesa se dió mucha mayor importancia a las cuestiones técnicas que a las puramente económicas. El tiempo transcurrido (ocho años) ha hecho, sin duda, evolucionar esta materia, pues entonces se atendió con preferencia al examen de la eficacia de la electrificación ferroviaria (1).

Naturalmente, el valor de las fórmulas dadas en lo que precede, con cuya aplicación se determina la inclusión de cada línea en el plan, no es exacto, absoluto, sino que constituye una primera aproximación. Por mejor decir, sirven para resolver la duda de si una determinada línea debe o no electrificarse, pues sabido es que hay tipos de líneas en que la electrificación se impone, como la travesía de la mayoría de los puertos numerosos que forman el mayor obstáculo al desarrollo de nuestra red de ferrocarriles: Pirineos, montes cantábricos, etc., por las dificultades, en ninguna parte superadas, de la explotación por vapor. Así como también existen numerosos ferrocarriles en que a primera vista se comprueba no conviene su electrificación, por su

actual débil tráfico y ninguna posible ampliación en el futuro. Fuera de estos dos casos es cuando realmente es eficaz la aplicación de las fórmulas y conclusiones obtenidas precedentemente.

Pero también es necesario advertir que la aplicación estricta, sin interpretación, de los resultados de las fórmulas, es necesario completarla con el estudio individual de cada línea, ya que sus características pueden conducir a modificar en parte el criterio de electrificación formado. Así, por ejemplo, de que el tráfico medio de los ferrocarriles explotados por la Compañía del Norte sea mayor que el mínimo económico exigido por las fórmulas [12] a [25], no quiere decir que se deba proceder a su total electrificación, por la existencia de factores que no pueden encerrarse en la deducción de una fórmula, aunque esta sea lo más general posible. Así, la proximidad a centros productores de energía eléctrica, el aprovechamiento en la electrificación de energía eléctrica que de otra forma no podía ser utilizada (carbones de calidad inferior, por ejemplo), el desarrollo del tráfico futuro una vez electrificada la línea, etc., son razones que complementan (nunca contradicen) la estricta aplicación de las fórmulas halladas. Guiaron estas consideraciones la inclusión de varios ferrocarriles en el plan general que se propone en este trabajo.

Por último, el examen económico del problema de electrificación de los ferrocarriles españoles no termina con la determinación de qué líneas deben integrarlo, sino que es preciso estudiar estas otras dos cuestiones:

a) Resultados económicos de la electrificación propuesta.

b) Investigación de la energía que se necesita para la tracción.

La primera será objeto del capítulo siguiente, fin de este trabajo.

En la segunda cabe distinguir:

1.º Energía hidráulica existente.

2.º Energía térmica.

3.º Precio medio de la energía para la electrificación de ferrocarriles, que se desarrollarán en lo que sigue.

Haremos notar antes, que la Comisión oficial nombrada en el año 1920, y a que hemos hecho mención más arriba, propuso la electrificación de 1 407 km de nuestros ferrocarriles de interés general. El lector verá después que esta cifra es bastante mayor en nuestro trabajo porque, transcurridos seis años, las condiciones en que el asunto se planteaba entonces han variado sensiblemente, tanto en la más perfecta técnica de la electrificación como en el desarrollo de la producción de la energía hidráulica en nuestro país, que sería grave pecado no aprovechar, y más aún con el crecimiento del tráfico en nuestras líneas férreas. Además, el impulso dado por el Gobierno, recientemente, con la Red Nacional de Energía Eléctrica, a la producción futura de tal energía, autoriza a ser optimistas, dentro de límites razonables (1), sobre la mayor disponibilidad de energía eléctrica, cuyo natural aprovechamiento debe ser la electrificación de ferrocarriles, impulso que todavía será mayor, y sobre todo más próximamente reali-

(1) Véanse, entre otros, los trabajos de los Sres. Sánchez Cuervo y Jiménez Ontiveros sobre crítica del Real Decreto concerniente a la dicha Red nacional, publicados en *España Económica y Financiera*.

(1) Ver el interesante *Rapport* de M. Manduit.

zable, con la creación de las Confederaciones hidrológicas, uno de los mayores aciertos, entre los muchos que tiene en su haber, el actual ministro de Fomento.

Energía hidráulica existente para la electrificación

Pocas palabras podemos dedicar al examen de este importante asunto, aunque deseamos sean las suficientes para demostrar que el problema de la energía hidroeléctrica no existe en España, ni aun considerando en plena explotación toda la extensa red de ferrocarriles que aquí se aconseja sean electrificados.

No hay, al menos no la hemos visto nunca, una estadística completa de producción actual de energía eléctrica en España. Es más, puede decirse que actualmente no se conoce ni la potencia total de las centrales hidroeléctricas, ni de otro orden de explotación (1). Puede, sin embargo, formarse idea aproximada de la cuantía total de energía eléctrica disponible, por medio de estadísticas oficiales (aunque sólo reducidas), de particulares, de estudios y datos de las mismas Compañías, etc.

El primer dato que, un poco concretamente, puede deducirse, es que existen en España centrales hidroeléctricas con una potencia total de 709 481 kilowatios (2).

El ingeniero de Caminos, tan competente en estas materias, Sr. González Quijano, en trabajo recientemente presentado a la World Power Conference, señala una potencia total hidráulica en explotación de 1 261 118 CV, cifra que corresponde a la máxima utilización del caudal de las concesiones (928 279 kilowatios). Podemos, pues, fijar la cifra de *un millón* de kilowatios instalados, de origen hidráulico, para la potencia actual, o muy próximamente, existente en España, de la índole indicada. Pero la cifra en sí misma no tiene valor grande al objeto de la electrificación de nuestros ferrocarriles, comparado con el «factor de utilización» de las centrales. En efecto, la relación entre el consumo realmente verificado en una central hidroeléctrica, o conjunto de ellas, y el máximo que podría producirse en virtud de su potencia instalada, es sumamente bajo, al punto que en gran número de centrales no llega al 30 por 100, y no sería prudente establecer para ese valor, tomado como media, un número que excediera de 25 por 100. Puede entonces muy fácilmente darse el lector perfecta idea de lo que significaría el consumo de una red de ferrocarriles electrificada, a los efectos del mejoramiento del factor de utilización de las centrales productoras de energía, de su factor de carga, que mejorarían notablemente, siendo este aspecto de la electrificación de ferrocarriles uno de los más interesantes que cabe señalar.

Esta consecuencia es de tal importancia que es preciso detenerse en ella. El consumo anual, y por tanto la potencia media que exige un programa de electrificación como el deducido en este trabajo, llega a 175 000 kilowatios, aproximadamente (3). Esta potencia ha sido calculada tomando un tráfico en las distintas líneas muy próximo al real o algo superior, analizando los numerosos datos (de otro modo no hubiera sido posible) que existen en el Consejo Superior de Ferrocarriles. Pues bien: para la obten-

ción de esta energía con destino a los ferrocarriles electrificados, no necesitaríamos construcciones de aprovechamientos nuevos de saltos de agua, sino que bastaría con las actuales centrales productoras, con la enorme ventaja que en todos los órdenes supondría el mejorar grandemente su factor de utilización. La Red Nacional de Energía Eléctrica, aunque por el pronto sólo se limitara al *agrupamiento y conexión* de las fuentes de energía actualmente en explotación, formando así el «primer elemento» de la dicha Red (1), sería bastante a distribuir la energía a las principales líneas. Pero hay más aún, pues si analizamos la situación geográfica de las principales Empresas productoras, vemos que en todo momento estaría asegurada la alimentación de las líneas que se propone en este estudio sean electrificadas. En efecto, el grupo Barcelona Traction, Light and Power Co., Riegos y Fuerzas del Ebro y Energía Eléctrica de Cataluña, suministraría toda la energía necesaria a la tracción en Cataluña y Aragón, que en aquella principalmente es donde reside la mayor red a electrificar. La Hidroeléctrica Ibérica (hablamos sólo de lo *actual*), al Norte; la Unión Eléctrica Madrileña, Eléctrica de Castilla, Hidroeléctrica Española, en el Centro; la misma Hidroeléctrica Ibérica, en Levante; la Compañía Anónima Mengemor, Sociedad del Valle de Lecrín, Hidroeléctrica del Chorro, Compañía Sevillana de Electricidad, en el Sur; la Eléctrica del Viesgo, Sociedad General Gallega de Electricidad, al Noroeste, etc., auxiliadas de entidades menores, bastarían indudablemente (en el presente) al abastecimiento de las necesidades del programa de electrificación fijado por nosotros.

¿Y en el porvenir? Si fijamos otros veinte años, por ejemplo, el tráfico de nuestros ferrocarriles habrá indudablemente aumentado. ¿En qué cuantía? Difícil es de prever nada en materia ferroviaria. Pero, según se razona después, el tráfico actual supuesto para la electrificación, valor medio en toneladas-kilómetro/kilómetro, tiene por valor 3 290 000 toneladas-km/km, y al cabo de *veinte* años más, siguiendo la ley de crecimiento (un poco por exceso, debido al incremento de tráfico que casi siempre sigue a una electrificación) de los años anteriores, desde 1909 a 1926 (datos que existen en el Consejo Superior de Ferrocarriles), dicho tráfico se convertirá, al final del año 1946, en 5 920 000 ton-km/km. Entonces el consumo de energía habrá también aumentado. Y si lo suponemos proporcional al incremento de las unidades de tráfico, resulta que en dicho año 1946 es preciso *disponer* de 529 000 CV ó 380 000 kilowatios, en el conjunto de las instalaciones hidráulicas y térmicas.

Esta cifra de 380 000 kilowatios creemos sinceramente puede fácilmente obtenerse, para esa fecha relativamente próxima, del enorme caudal de energía hidroeléctrica existente en España, si es que parece insuficiente, aun contando con la potencia disponible, el que supondría el mejoramiento del factor de utilización de las centrales hoy en explotación.

Y, en efecto, si antes hemos dicho que no se sabe ciertamente la cuantía de la potencia instalada, por falta de estadísticas completas, menos fundamento todavía hay al pretender fijar la potencia hidráulica disponible en el territorio español. Cálculos particulares, aunque hechos por hombres capacitados en alto

(1) *Ingeniería y Construcción*, enero de 1927.

(2) *Anuario de Electricidad*. Ministerio de Trabajo. Inspecciones y verificaciones de contadores, etc.

(3) Véase el cuadro-resumen que adjuntamos.

(1) Trabajo antes citado del Sr. Jiménez Ontiveros.

grado, hacen variar esta potencia en 3-4 000 000 de caballos-vapor, y en las estadísticas extranjeras figura frecuentemente la cifra de 4-5 000 000 de CV, la energía total hidráulica de España (1). Pero aunque un dato sobre esta materia siempre es interesante, lo es mucho más el obtener el convencimiento de que en fecha próxima, y debido al aprovechamiento del caudal de nuestros grandes ríos, o sus cuencas hidrográficas, habrá la suficiente potencia instalada para las necesidades del consumo exigido por la electrificación de ferrocarriles propuesta y para las demás industrias nacionales. En efecto, es indudable que la creación de las Confederaciones Hidrográficas (Real decreto de 5 de marzo de 1926) ha de contribuir eficazmente al pronto aprovechamiento de las energías hidráulicas de los principales ríos de nuestro país. La iniciativa particular no encontraría modo tan rápido de desarrollarse como el proporcionado por estas Confederaciones. En 800 000 CV pueden estimarse las concesiones privadas en la cuenca del río Ebro, que con los caballos-vapor hasta ahora instalados, pasarán de 1 200 000 CV los disponibles en este sector, cifra que en el preámbulo del Real decreto citado se estima en la mitad de la energía utilizable en toda España. Creada la Confederación, por lo que respecta al Tajo, la Comisión de técnicos, nombrada por Real orden de 28 de diciembre de 1918, estimó en 160 000 CV la energía aprovechable, apreciaciones a las que es preciso unir la de los ingenieros de Caminos Sres. García Faria y Valdés. Importantes también son las potencias eléctricas que se obtendrán en la cuenca del Segura, sobre todo con la regulación de caudal que producirá la construcción de los pantanos de Fuensanta y Taivilla; en la del Guadalquivir, por la Compañía Mengemor, etc., y por último, la importantísima de los saltos del Duero (2), que por el Real decreto-ley de 23 de agosto de 1926, de ordenación de sus riegos, entra en la fase activa de una solución definitiva. Sin necesidad de dar una cifra total de energía a implantar próximamente, que sería sólo groseramente aproximada, es evidente que la electrificación de los ferrocarriles propuesta en este trabajo, con potencia actual de 225 000 CV y 529 000 CV al fin de un período de veinte años puede acometerse sin temor alguno por lo que a la energía hidroeléctrica se refiere.

Energía térmica disponible

La Comisión permanente del Consejo Superior de Fomento, al estudiar los capítulos relacionados con la Red Nacional de Energía Eléctrica, encontró, según los datos suministrados por el presidente del Consejo de Minería, D. José María Rubio, que se podía calcular en 500 000 CV la energía térmica disponible, distribuida en las siguientes proporciones en las zonas respectivas:

Zona de Asturias. Capacidad de suministro de energía, 1 680 000 toneladas de carbón, o sea 168 000 kw a la equivalencia de un kilogramo por cada caballo-hora (3).

(1) El lector puede documentarse del modo más completo con los trabajos del eminente ingeniero de Caminos Sr. Quijano, sin duda alguna los más importantes en esta materia. (Véase, entre otros, el publicado en la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, 15 agosto 1926, donde fija la potencia de las concesiones en 4 734 593 HP. y la total disponible en 6 500 000 HP.)

(2) Se estima en más de 800 000 CV la potencia efectiva aprovechable.

(3) Hubiéramos deseado mayor precisión en esa equi-

Zona de León.	360 000 ton y 36 000 kw.
Zona de Palencia.	126 000 ton y 13 000 kw.
Zona de Córdoba.	126 000 ton y 13 000 kw.
Zona de Sevilla.	84 000 ton y 8 000 kw.
Zona de Ciudad Real y Puerto- llano.	700 000 ton y 70 000 kw.
Zona de Teruel.	800 000 ton y 85 000 kw.
Zona de Barcelona.	200 000 ton y 20 000 kw.
Zona de Zaragoza.	180 000 ton y 18 000 kw.
Zona de Santander.	18 000 kw.
Zona de Lérida.	20 000 kw.
Zona de Alhama de Murcia. ...	10 000 kw.

Esta cifra, suma de las anteriores zonas, de 480-500 000 kilowatios, sería en su mayoría obtenida con carbones de calidad inferior, obteniéndose una energía económica en alto grado, cuyo campo de aplicación propio es la electrificación de ferrocarriles, ya que un consumo de esta importancia no es presumible por ahora en ninguna otra industria nacional.

Precio medio de la energía eléctrica en España

En el desarrollo de las fórmulas de mínima economía que ha sido el objeto de toda la primera parte de este estudio, hemos supuesto que el precio del kilowatio-hora era de 0,08 pesetas. Y es necesario justificar esta cifra, por la importancia en los resultados económicos de las electrificaciones. Desde luego, no puede tomarse como base para la determinación de un precio medio de la energía en España el importe de los capitales empleados en los establecimientos eléctricos, porque los gastos de explotación de cada Empresa son diferentes, y diferentes también sus factores de utilización, sus rendimientos, etc. Observaremos también que el precio se ha de entender medida la energía en alta tensión, en forma generalmente de corriente trifásica a cincuenta pps, con lo que, naturalmente, el del kilowatio-hora distribuido vendría aumentado en el coste correspondiente a los sistemas de transporte, transformación y distribución. Distingamos primeramente el coste de producción, lo que servirá de punto de comparación para el de venta. Un cuadro resumen de estos costes de producción nos lo da el Sr. Gelpi en su obra *Aprovechamiento de las energías naturales*, que desde luego son calculados con factores de utilización algo fuertes, aunque la electrificación de ferrocarriles, con su gran consumo, los haría aceptables:

Coste de producción del kw-h.—Centrales de 10 000 CV y diversos tipos.

TIPO DE CENTRAL,	Coste del kw-h	Factor de utilización
Hidráulica, salto alto, sin regulación.	0,015	50 %
Idem salto bajo, con regulación semanal. .	0,025	50 %
Idem, salto bajo, regulación anual.	0,033	50 %
Térmica, turbinas de vapor, parrillas automáticas, buenos carbones.	0,077	50 %
Idem, idem carbones en bocamina.	0,071	30 %
Idem, motores de gas, obtenidos en bocamina, por destilación.	0,070	30 %
Idem, motores Diesel, puertos de mar y núcleos de población.	0,085	50 %

valencia. ¿Dónde se entienden los caballos-vapor que sustituyen los kilogramos de carbón quemados en las calderas? ¿En corriente a baja, o media tensión, antes de su transformación elevadora, es decir, en la borna de la máquina? ¿En corriente en alta tensión, es decir, después de la transformación, a la salida de las centrales? En todos estos casos hay que tener presente los rendimientos y, por tanto, a todos ellos corresponden valores distintos de equivalencia. En nuestro estudio precisamos más, y decimos: «Los kilogramos de carbón que, quemados en el hogar de las locomotoras, sustituyen un caballo-vapor medido en las llantas de la misma, son 2,5 kg.» Esto hubiéramos deseado aquí.

Esto en cuanto al precio de producción del kilowatio-hora. Por lo que se refiere al precio de venta, es muy variable, de una localidad o región a otra, con la energía disponible, como es lógico. El señor González Quijano, ya citado anteriormente, fija los precios siguientes:

	Pesetas
Alumbrado, 0,40.	1,30
Pequeña industria, 0,15.	0,40
Gran industria, 0,06.	0,15

Valores que, por su separación en grupos, nos acercan más al objeto nuestro, desde el momento en que la electrificación de ferrocarriles, por su gran consumo, debe incluirse en la última clasificación. Las grandes Empresas productoras facturan siempre con arreglo a contratos especiales, en razón inversa el precio por kilowatio-hora con la cuantía del consumo. Así, es frecuente el precio de 0,10 pesetas por kilowatio-hora para consumos que pasen de 2-3 millones de kilowatios-hora anuales, y variando también con el factor de carga de las centrales de transformación a quienes se factura la energía. En el Real decreto de ordenación de los saltos del Duero, antes citado, se calcula el precio del kilowatio-hora variando de 0,10 pesetas a 0,60 pesetas el kilowatio-hora, y taxativamente a 0,10 pesetas para la tracción de ferrocarriles de interés general, pero medido en alta tensión al extremo de la línea de transporte. Nosotros, en el precio medio de 0,08 pesetas, lo suponemos medido en alta tensión, a la salida de las centrales, no incluyendo las cargas correspondientes a la línea de transporte, que aumentan algo su precio unitario. Por esta razón unida a que se mejora notablemente el factor de utilización de las centrales, a que se trata de un precio medio para toda España (concepto necesario para la generalización de nuestros cálculos) y, sobre todo, a los grandes consumos que correrán a cargo de los ferrocarriles electrificados, hemos tomado el precio de 0,08 pesetas para el kilowatio-hora.

Observaciones a los cálculos efectuados

En la determinación de todos los elementos del programa de electrificación, cuyo conjunto se ofrece en el cuadro-resumen adjunto, hemos tenido en cuenta varias cuestiones que es conveniente detallar. De este modo:

a) Tráfico actual asignado para la electrificación

No nos hubiera sido posible, sin los datos completos reunidos en el Consejo Superior de Ferrocarriles, ni pretender siquiera saber el tráfico actual probable de las líneas que se proyecta electrificar, pues en la mayoría de las Memorias de las Compañías no están especificados línea por línea, cosa aquí totalmente necesaria si se quiere proceder sinceramente. En realidad, el asignado por nosotros es algo superior, en algunos casos, al tráfico actual; pero ello es consecuencia del concepto mismo de la electrificación, cuyas numerosas ventajas (enumeradas cumplidamente en la segunda parte) se traducen casi siempre en un aumento del dicho tráfico (1). El tráfico total, para los tres grupos de líneas a electrificar, es de 14 226 650 000 ton-km, o sea 3 290 000 toneladas-km/km, densidad de tráfico que, tomada como valor medio, es ligeramente inferior a la del conjunto de las líneas explotadas por el Norte y M. Z. A. para 1925 (3 500 000 y 3 430 000 tonela-

das-km/km, respectivamente, suma de mercancías y viajeros). Puede verse en los gráficos que se acompañan, resumen de las características de explotación de las cuatro principales Compañías, los valores indicados.

b) Tráfico probable al cabo de veinte años

Es esta cuestión sumamente aleatoria, aunque conveniente se investigue algo acerca de ella. Los datos de tráfico de las principales Compañías de ferrocarriles españolas, dentro de las cuales cabe íntegramente el programa de electrificación propuesto, según el estado-resumen adjunto, los tenemos reunidos, desde el año 1909 hasta el 25 inclusive. La cuestión es ésta: ¿Qué ley de crecimiento ha seguido el tráfico en los años 1909-25? El coeficiente medio de aumento de las unidades de tráfico en los años considerados ha sido:

Norte.	1,045
M. Z. A.	1,044
Andaluces.	1,044
M. C. P.	1,029
Sur de España.	1,010
M. Z. O. V.	1,029
Lorca-Baza.	1,070

De donde el coeficiente medio de aumento de tráfico, en estas líneas, resulta ser de 1,04. Esto en cuanto al aumento de tráfico, que respecto a su ley de crecimiento, tomando los valores absolutos, año por año, parecen acercarse más a los dados por una ley lineal de aumento que por una ley exponencial de la forma $(1 + 0,4)^n$. Con este criterio han sido calculados los gráficos correspondientes a las principales Compañías y que por su extensión no pueden ser dados en estos artículos.

Si ahora suponemos que el tráfico de las líneas electrificadas seguirá aumentando en la misma proporción, es decir, con la ley lineal y coeficiente 1,04 (mínimum seguramente, debido al incremento de tráfico que la electrificación lleva siempre consigo), tenemos:

Tráfico actual de electrificación.	3 290 000 ton-km/km.
Tráfico futuro, al cabo de veinte años.	5 920 000 "
Consumo de energía para el tráfico actual.	582 353 000 kw-h anuales.
Consumo de energía para el tráfico futuro.	1 044 000 000 "

Y dado que el consumo de energía es proporcional al tráfico, tendríamos:

Potencia actual requerida por la electrificación.	225 000 CV	166 000 kw.
Potencia futura requerida por la electrificación.	529 000 CV	529 000 "

Y las potencias respectivas vienen a ser:

Potencia actual requerida por la electrificación.	225 000 CV	166 000 kw.
Potencia futura requerida por la electrificación.	529 000 CV	380 000 "

Potencia que, como vimos, es fácilmente obtenida del aprovechamiento de nuestros grandes ríos, sobre todo desde la creación de las Confederaciones Hidrológicas, como hemos hecho observar anteriormente.

c) Pendientes de las líneas

Tanto las pendientes máximas como las características han sido obtenidas, una por una, del examen de los perfiles de las líneas. Las primeras lo han sido sin dificultad; las segundas requieren cálculos laboriosos, puesto que hay que tener en cuenta todas las rampas y pendientes, sus productos por las longitu-

(1) Véase observación número 4 del estado-resumen.

des respectivas, su suma, etc. No es de extrañar haya algún pequeño error, por tanto, aunque en su determinación se ha puesto todo cuidado.

d) *Distribución en tres grupos de las líneas a electrificar*

Como ya hemos apuntado, se ha creído conveniente agrupar el programa total de electrificación en tres clases de líneas:

1.º A electrificar actualmente.

2.º A electrificar hasta el año 1946.

3.º A electrificar del plan de ferrocarriles, cuya construcción ha sido acordada por el Consejo Superior de Ferrocarriles, con 2 608 km, 1 207 km y 499 km, respectivamente, que dan un total de 4 314 km. La Compañía del Norte aparece con al mayor longitud a electrificar, 1 180 km, algo mayor

que el plan mismo de la Compañía M. Z. A., 762 km.

En el cuadro-resumen adjunto figuran los elementos principales de todo plan general de electrificación: líneas a electrificar, tráficos, economías brutas y costes kilométricos del establecimiento eléctrico. Rogamos al lector examine las observaciones del citado cuadro, ya que los cálculos efectuados se basan en varias hipótesis allí contenidas y explicadas.

En el artículo siguiente y último, trataremos de la justificación de la inclusión de varias líneas en el programa de electrificación, de los resultados económicos del plan propuesto y de la comprobación del grado de exactitud de este trabajo, en comparación con los datos de explotación de las principales electrificaciones mundiales.

Francisco JIMÉNEZ ONTIVEROS
Ingeniero de Caminos

Plan de electrificación de los ferrocarriles españoles de interés general.—Anteproyecto

LINEAS A ELECTRIFICAR	Longitud Km (1)	Pendiente característica Milésimas (2)	Pendiente máxima Milésimas (3)	Tráfico anual bruto Ton-km/km (4)	Consumo energía Kw-h anuales (5)	Potencia Kw (6)	Economías brutas Ptas. anuales (7)	COSTE TOTAL ELECTRIFICACION (8) Ptas.	Fórmu- las (9)
1) NORTE									
Madrid (Ppe. Pio)-Atocha....	7	8	10,60	2 800 000	774 500		91 500	1 012 100 (8')	
Madrid-Villalba (doble vía)....	38	8	10,40	5 850 000	8 807 500		1 040 000	14 332 400 (8')	
Villalba-Avila (doble vía)....	70	13,50	20,60	3 750 000	12 410 800		1 330 000	24 353 300 (8')	
Villalba-Segovia....	63	16	22,63	2 100 000	6 138 700		989 400	15 794 550 (8')	
Miranda-Bilbao....	104	10	15,70	5 500 000	25 082 800		2 475 200	19 380 400	
Quintanilla-Reinosa....	27	6	15,58	2 350 000	2 365 700		291 600	3 092 101	
Reinosa-Las Caldas....	60	15	19,98	2 350 000	10 049 000		1 062 000	9 343 500	
Las Caldas-Santander....	34	4	18,87	2 350 000	2 980 200		367 200	4 158 200	
Alsasua-Bensain....	45	13,50	15,70	4 100 000	9 081 400		994 500	14 808 500	
Beasain-Irún....	58	3	12,20	4 100 000	8 869 000		980 200	10 880 000	
Ujo-Gijón-Avilés....	115	11,30	20	3 500 000	18 080 700		1 978 000	17 940 000	
Astorga-Ponferrada....	77	12,50	19,95	3 100 000	12 293 000		1 178 100	11 088 000	
Valencia-Castellón....	69	3,60	7,10	3 750 000	9 650 400		1 041 900	15 886 600	
Valencia-Játiva (doble vía)....	55	4,30	10	3 500 000	7 158 200		775 500	16 000 000 (8')	
Játiva-La Alfranca....	58	10	15,50	3 500 000	8 814 700		980 200	8 154 800	
Barcelona-Manresa (doble vía)....	64	8	16,50	5 500 000	13 950 000		1 645 600	22 064 000 (8')	
Manresa-Lérida....	118	13	20,40	3 500 000	21 806 400		2 136 580	28 090 000 (8')	
Moncada-S. Juan Abadesas....	106	14,50	20	2 500 000	15 255 000		1 452 200	27 500 000 (8')	
TOTAL.....	1 180				106 568 900		20 810 280	263 978 401	
M. Z. A.									
Madrid-Alcázar (doble vía)....	149	5,50	9,55	5 500 000	30 896 000		3 638 800	38 790 800	
Barcelona-Villanueva-S. Vicente....	67	3	6,31	4 100 000	11 246 300		1 132 300	7 973 000	
Barcelona-Martorell-S. Vicente....	83	9,70	14,80	3 700 000	13 471 600		1 419 300	11 969 000	
S. Vicente-Reus....	40	6,50	12,50	4 100 000	6 117 200		672 000	5 760 000	
S. Vicente-Tarragona....	25	6,80	9	3 700 000	3 350 000		372 500	3 000 000	
Barcelona-Granollers-Impulme....	70	7,50	14,00	2 900 000	7 571 000		857 500	8 750 000	
Barcelona-Mataró-Impulme....	76	2,50	10,30	3 700 000	10 488 000		1 086 400	8 800 000	
Empulme-Port-Bou....	98	8	15,60	4 200 000	15 066 000		1 829 700	15 080 000	
Baeza-Valdepeñas....	90	10	16	3 850 000	15 556 000		1 701 000	13 500 000	
Baides-Arcos de Jalón....	64	10	14,20	3 500 000	10 057 600		1 072 000	8 890 000	
TOTAL.....	762				124 420 300		13 791 500	114 312 800	
ANDALUCÍAS									
Linares-Almería....	251	17	27,50	2 200 000	23 329 800		3 928 000	34 211 000	
Bobadilla-Málaga....	70	8	18,60	2 400 000	6 956 100		709 500	7 553 000	
Bobadilla-Algeciras....	177	13	20	2 750 000	2 570 000		2 575 300	13 575 000	
TOTAL.....	498				32 855 000		7 200 800	55 339 000	
Lorca-Baza-Aguilas....	168	10,50	20	2 500 000	18 858 000		2 016 000	21 072 000	
TOTAL LONGITUD A ELECTRIFICAR ACTUALMENTE.....	2 608				372 703 100		43 824 580	455 302 201	
2)									
Sevilla-Córdoba-Baeza....	258	5	13,70	4 250 000	41 120 000		4 580 000	38 880 000	
Bobadilla-Granada....	123	12	25	2 250 000	14 837 500		1 353 000	16 420 000	
Granada-Moreda....	60	8	20	2 100 000	4 989 600		495 000	6 420 500	
Orense-Vigo....	132	6	18	2 800 000	13 786 000		1 511 400	15 780 000	
Baza-Guadix....	53	8	25	1 800 000	3 700 000		429 300	5 500 000	
Miranda-Alsasua....	76	5	10,50	4 100 000	11 622 600		1 289 600	9 520 000	
Alcázar-Valdepeñas....	76	3	5,77	3 850 000	10 913 800		1 227 400	7 800 000	
Zuera-Canfranc....	152	10	20	2 500 000	17 100 000		1 818 800	17 088 000	
Zaragoza-Castejón....	94	3,40	10,50	3 500 000	12 260 700		1 353 600	10 760 000	
Zaragoza-Lérida....	183	9	18	3 500 000	20 020 100		2 940 100	17 260 000	
TOTAL A ELECTRIFICAR HASTA EL AÑO 1910.....	1 207				150 368 800		17 004 100	145 428 500	
3)									
Gran circunvalación de Madrid....	70	6	15	3 500 000	9 138 500		1 008 400	9 095 000	
Puertollano-Córdoba....	141	8	20	2 950 000	16 471 000		1 720 200	19 880 000	
Baza-Calasparra....	145	10	20	2 200 000	13 328 800		1 464 500	17 530 000	
Jaca-Sangüesa....	73	11	20	2 100 000	7 371 100		868 700	7 890 000	
Del F. C. de Lérida a Saint-Girons por el Valle de Arán a Les....	70	11	20	2 100 000	6 072 000		833 000	7 580 000	
TOTAL DE LINEAS A ELECTRIFICAR DEL PLAN DEL C. S. DE F. C.....	400				53 282 000		5 895 100	62 575 000 (10)	
Total de totales.....	4 314								
				Actual ... = 14 220 650 000 ton-km = 3 290 000 toneladas km/km. A los 20 años = 5 920 000 ídem.	582 353 400 kw-h.	166 000 kw= =225 000 CV. A los 20 años 529 000 CV.	66 723 780 A los 20 años: 120 000 000	(8') 663 304 701 Compañías. (8') 577 343 640 Fórmulas.	

Consumo de energía: Fórmula [5].
Economías brutas: Fórmulas [16], [17], [20], [21], [24] y [25], según los casos a considerar.
Coste de electrificación: Fórmulas [14] y [15], según los casos a considerar.

OBSERVACIONES AL CUADRO ANTERIOR

- (1) La longitud está tomada sólo en kilómetros completos.
- (2) La pendiente característica se ha calculado de los perfiles de las Compañías. En los ferrocarriles aún no construidos y sin proyecto, se han tomado las pendientes, aproximadamente, en relación con el terreno del trazado.
- (3) Idem.
- (4) Para encontrar el tráfico anual en cada línea se han utilizado las Memorias de las Compañías y los numerosos datos que obran en el C. S. de F. C. El tráfico total supuesto es el de electrificación, para cada línea, algo superior al real actual. Las Memorias de las Compañías no suelen dar datos suficientes, línea por línea, para calcular el tráfico. Así, M. Z. A. sólo da el número de kilómetros-tren para el conjunto de la red Catalana, y suponiendo una composición media de los trenes de 400 toneladas brutas total para la electrificación, se han obtenido los tráficos que figuran en el cuadro, a la vista, además, de las condiciones de cada línea. Y del mismo modo se ha procedido para otras Compañías.
- (5) Hemos empleado las fórmulas correspondientes del consumo de energía, suponiendo que las locomotoras llevan recuperación de energía solamente para pendientes características mayores de 15.
- (6) El cálculo de la potencia necesaria se ha hecho bajo la base de que el factor de carga de las centrales generadoras era igual a 0,40. (Véase el artículo siguiente.)
- (7) El cálculo de las economías brutas se ha hecho tomando siempre la tensión de 1 500 voltios, con recuperación sólo a partir de pendientes características mayores de 1 500, y utilizando las fórmulas [25] a [12], o los gráficos correspondientes.
- (8) IMPORTANTE.—Las fórmulas obtenidas para encontrar el coste kilométrico lo han sido generalizando extraordinariamente los resultados y tomando precios unitarios para el material, que sin duda sólo pueden considerarse como aproximadas. Además, hemos supuesto un tráfico determinado en la línea, tráfico que influye directamente en el coste kilométrico de electrificación. Por todo ello, y principalmente porque cada Compañía, al efectuar el proyecto de electrificación, sólo tiene en cuenta sus necesidades, como es lógico, y fija un número de locomotoras tal que no coincidirá con el número de kilogramos de locomotora necesarios para el tráfico supuesto según nuestros cálculos; por todo esto, repetimos, el coste de electrificación es siempre mayor en los proyectos particulares de cada Compañía que el resultante del método general establecido en este trabajo, cuestión que para nada altera el valor de nuestros cálculos. Así: cuando una Compañía fija un número de locomotoras eléctricas mayor que el resultante según el tráfico y según nuestras fórmulas, hasta solamente añadir el coste de ese número de locomotoras, que es como hemos procedido en el apartado siguiente.
- (8') Es consecuencia de lo anterior, que en todas las líneas marcadas con (8'), el coste total de electrificación es sensiblemente mayor al obtenido por nuestras fórmulas. Los valores puestos para cada línea los hemos encontrado suponiendo las nuevas carac-

terísticas de electrificación de cada Compañía, en aquellas líneas que hasta ahora han estudiado, especialmente para el número de locomotoras impuesto por las Compañías. Por tanto, allí donde no coinciden los valores de los costes kilométricos de las fórmulas con los que figuran en este cuadro, es por haber supuesto un mayor número de locomotoras que las exigidas por el tráfico y dadas por nuestras fórmulas. Para mayor claridad, damos las dos cifras, una teniendo en cuenta los proyectos de las Compañías Norte y M. Z. A., y otra según nuestras fórmulas, aplicada rigurosamente, o sea: 663 304 301.

(9) Unas veces hemos calculado a base de las fórmulas y otras de acuerdo con lo expuesto en los apartados (8) y (8').

(10) El coste total de electrificación, tanto el total general como el particular para cada Compañía, ha de variar forzosamente—creemos necesario repetirlo—con los programas de electrificación de cada Compañía. Así, el Norte y M. Z. A. tienen efectuados sus programas de electrificación, donde se incluyen muchas partidas, que nosotros no teníamos por qué tomar en cuenta: talleres especiales, desviación de líneas, mayor número de locomotoras, automotores, servicios diversos, etc. Basta hojear el último presupuesto de electrificación de Barcelona a Manresa y San Juan de las Abadesas, que importa 41 000 000 de pesetas, distribuido en las partidas siguientes,

		Pesetas
Capítulo I.—Línea aérea de contacto.....	11 916 803,80	
II.—Subestaciones convertidoras.....	4 772 470,00	
III.—Locomotoras eléctricas.....	8 833 000,00	
IV.—Coches automotores y remolques.....	11 018 462,00	
V.—Obras accesorias.....	1 300 000,00	
VI.—Mejoras e imprevistos.....	3 159 264,20	
TOTAL.....	41 000 000,00	

donde se ve que los capítulos IV, V y VI no son comprendidos en nuestro estudio, y, por tanto, su coste, razón que explica la diferencia en los resultados obtenidos por nuestras fórmulas.

En resumen, el coste total encontrado de 663 304 301 pesetas para la electrificación de los 4 314 kilómetros, o sea 154 000 pesetas por kilómetro, podrá variar si se compara sumando a sumando con los proyectos de electrificación de cada Compañía, en virtud de necesidades y características propias de cada explotación; pero en conjunto, y como queda demostrado en toda la labor anteriormente expuesta, es cifra suficientemente aproximada para obtener consecuencias de índole general, fin último de este trabajo.

Los transportes por carreteras en las obras hidráulicas

Las grandes obras hidráulicas necesitan, para su ejecución, el transporte de un gran tonelaje de materiales; cemento, maquinaria, tubería para los saltos, etcétera. Generalmente estas obras se encuentran a gran distancia de ferrocarril, suponiendo el transporte por carretera un incremento importante en el presupuesto de la obra, incremento difícil de determinar en muchas ocasiones.

Por si algo puede servir un ejemplo, me atrevo a reseñar el que se le presentó a la Hidroeléctrica Ibérica en el Salto del Cinca (Pirineos de Huesca), y los precios a que obtuvo la unidad de transporte.

Descripción de las obras

El aprovechamiento del Cinca de que se trata está situado en el nacimiento de este río: tiene 20 km de canal, derivando las aguas de los ríos Cinca, Barrosa y Chisagties con sendas presas, de derivación las dos últimas, y creando un pequeño embalse de regulación semanal la primera, con una presa de 5 m de altura, mixta de escollera y tierra. El salto obtenido sobre Lafortunada es de 453,50 m, utilizándolo por medio de una tubería de 1 600 m de longitud.

Del depósito de carga, de una capacidad de 35 000 m³, parten dos tuberías de hormigón armado de 1,60 m de diámetro interior, hasta la presión de 6 atmósferas; sigue de chapa de palastro roblonada hasta las 18 atmósferas, enlazando con la compuesta de tubos Mannesmann hasta las 33 atmósferas. Después se trifurca la tubería por medio de piezas especiales, reduciéndose su diámetro interior a 1,20 m y continuando hasta la Central con tubos Mannesmann. Tanto el canal como la tubería son capaces de 12 m³ por segundo de caudal.

En la Central se han instalado tres grupos de 20 000 CV cada uno, compuestos de una rueda Pelton de eje vertical, con tres inyectores y un alternador trifásico de 15 000 kv de potencia a 6 600 voltios de tensión. En la explanada inmediata a la Central, a la intemperie, se eleva la tensión a 132 000 voltios por medio de transformadores monofásicos de 5 200 kv-a, transportándose la energía a Bilbao por una línea de seis conductores de aluminio sobre postes metálicos, y de una longitud de 285 km.

Para la ejecución de las obras descritas y para el desarrollo de los varios proyectos que la Hidroeléctrica tiene en esta zona, se construyeron 20 km de carretera, un salto auxiliar de 400 CV, varios kilómetros de caminos y sendas, una pequeña fábrica de cemento natural y otra de cemento portland, de 20 ton de producción diaria.

Las obras se comenzaron en los primeros meses de 1919, funcionando un grupo de 20 000 CV en enero de 1923, el segundo en julio del mismo año y el tercero en septiembre de 1926.

Tonelaje transportado.—La Central está situada en Lafortunada, a 84 km de Barbastro, la estación de ferrocarril más próxima, y unida a ella por las carreteras de tercer orden de Barbastro a la Frontera (18 km), El Grado a Broto (46 km) y Ainsa a la Frontera (20 km), con fuertes rampas, curvas de poco desarrollo, sobre todo en el Puerto del Pino, y firme mal conservado.

Indicados los plazos en que se efectuaron las obras se comprenderá la gran intensidad de transporte en los años 1920, 21 y 22, en los que hubo que arrastrar más de 1 000 t de maquinaria hidroeléctrica, 2 600 t de tubería, 3 000 de carbón para las fá-