

Si $\Delta < 0$, α es una imaginaria y la solución general de la ecuación (3) es una expresión de la forma

$$i = Me^{-at} \sin(bt + n) \quad (7)$$

en que $b^2 = -\Delta$ y M y n dos constantes de integración que dependen de las condiciones impuestas. Es, pues, un movimiento periódico amortiguado.

Si, al contrario, $\Delta \geq 0$ el movimiento es aperiódico y no se produce fenómeno de interés para nosotros.

En el movimiento periódico amortiguado expresado por (7), las elongaciones sucesivas siguen una ley logarítmica, y el período resulta ser:

$$T = \frac{2\pi}{b} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{R^2}{L^2} - \frac{4}{CL}}} \quad (8)$$

Examinaremos ahora el caso en que el segundo miembro de la ecuación diferencial (3) en lugar de ser nulo sea una función sinusoidal, es decir, la forma más sencilla de una función periódica:

La ecuación diferencial será, pues:

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{r}{L} \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i = \frac{P}{LC} \sin(dt + \varphi). \quad (9)$$

Tenemos una solución particular de (8) con la expresión

$$i_1 = F_1 \sin(dt + \varphi - \psi).$$

Si derivamos i_1 dos veces con respecto a t , y que sustituimos en (9), hallamos los valores de F_1 y de ψ que satisfacen a ésta. Son:

$$F_1 = \frac{P}{c \sqrt{\left(\frac{1}{c} d^2\right)^2 + \frac{r^2}{L^2} d^2}}$$

$$\tan \psi = \frac{rcd}{1 - d^2LC}$$

Por otra parte, en el caso del movimiento periódico, el único que nos interesa, tenemos otra solución particular, la que hemos hallado en el caso del segundo miembro nulo, ó sea:

$$i_0 = Me^{-at} \sin(bt + \varphi), \quad (10)$$

de modo que la solución general será:

$$i = i_0 + i_1. \quad (11)$$

En la expresión (11) i_0 representa la parte transitoria del movimiento, la cual se superpone a la parte sinusoidal permanente i_1 del mismo.

El período de i_0 es generalmente distinto del de i_1 ; depende, exclusivamente, de las relaciones entre las varias constantes del circuito.

Si, en fin, consideramos el caso general de una fuerza electromotriz periódica que puede desarrollarse en serie de Fourier, de tal modo que

$$\frac{de}{dt} = f_0 + \frac{1}{LC} \sum_{n=1}^{\infty} P_n \sin(ndt + \varphi_n). \quad (12)$$

La solución general de la ecuación diferencial seguiría siendo:

$$i = i_0 + \sum_{n=1}^{\infty} i_n,$$

con la condición que

$$i_n = F_n \sin(ndt + \varphi_n - \psi_n),$$

en la cual F_n y ψ_n se definen como F_1 y ψ_1 en el caso anterior.

Según las condiciones de resonancia de las armónicas de mayor importancia, pueden producirse elevaciones momentáneas considerables de la intensidad y de la tensión.

H. M. LEVYLLIER.

(Continuará.)

(De los Anales de la Sociedad Científica Argentina.)

LA ENERGÍA HIDROELÉCTRICA DE ESPAÑA Y SUS APLICACIONES

(CONTINUACIÓN) (1)

Principales aplicaciones industriales de la energía eléctrica.

En términos generales puede hacerse la siguiente clasificación de las aplicaciones industriales, de importancia, de la energía eléctrica:

- 1.º Alumbrado.
- 2.º Calefacción.
- 3.º Fuerza motriz para la industria en general.
- 4.º Tracción eléctrica aplicada a los transportes.
- 5.º Aplicaciones electroquímicas.

Las cuales, a su vez, pueden subdividirse en

- a) Utilización de la energía eléctrica como medio de producir calor; y
- b) Utilización de la energía para la electrólisis.
- 6.º Aplicaciones electromagnéticas.

Aplicaciones de la energía eléctrica para alumbrado.

Respecto del alumbrado eléctrico poco nuevo puede decirse que no sea del dominio público.

Es oportuno, no obstante, mencionar que los perfeccionamientos de las lámparas incandescentes han reducido en tales proporciones el consumo de energía eléctrica, que no hay otro procedimiento de alumbrado más barato ni más cómodo, lo que ha determinado su generalización en todas las partes del mundo, a pesar del último esfuerzo de los gasistas con el empleo de los manguitos incandescentes y con la utilización del gas a gran presión.

Calefacción eléctrica.

No puede decirse lo propio acerca de esta aplicación doméstica de la electricidad que, sólo en casos particulares, podrá proporcionar ventajas derivadas de la facilidad y rapidez de su uso en un momento dado y de la limpieza y facilidad de traslado de los aparatos empleados para convertir la electricidad en calor; fuera de esto, no se vislumbra siquiera la posibilidad de obtener por este procedimiento ventajas económicas sobre los de producción y distribución del calor hoy en uso, aun con precios de la energía eléctrica mucho más bajos que los actuales.

Aplicaciones de la electricidad como fuerza motriz.

Por lo que se refiere a la utilización de la energía eléctrica como medio de transportar y aplicar la energía mecánica, el dominio de la electricidad es prácticamente absoluto.

(1) Véase el número anterior.

Sea cualesquiera el elemento mecánico productor de la corriente, con raras excepciones, como molinos y fábricas establecidas en las márgenes de los ríos que utilizan directamente la energía mecánica producida por el artefacto hidráulico, siempre se emplea la corriente eléctrica entre el manantial de la energía y el elemento en que se aplica. La facilidad de su transporte y la divisibilidad que puede llevarse a límites casi inconcebibles, unidas a la sencillez, poco peso (en reacción con la capacidad), robustez y baratura de los motores eléctricos, cuya perfección no disminuye, no obstante, la extensísima escala de tamaños a que se ha llegado (lo mismo se aplica un motor de 25 vatios que de 25 millones) y su facilísima adaptación a cualquier máquina ó aparato, han hecho que sea muy raro ver uno ó un conjunto de éstos que no esté provisto de su motor eléctrico.

Recorriendo las regiones industriales del mundo, se admira el dominio absoluto de la electricidad en las aplicaciones en que pueda actuar como fuerza motriz.

Tracción eléctrica.

En cuanto á la utilización de la energía eléctrica en la tracción, es de todos conocida la idea de que en los sistemas de transportes urbanos de viajeros, ó sean los tranvías, se utiliza con carácter general la energía eléctrica como elemento tractor.

No puede decirse lo propio del sistema general de transportes, ó sea de los ferrocarriles; en ellos, muy especialmente en Europa, se conserva, salvo contadas excepciones, el sistema de tracción de vapor; en América, sin embargo, tiene mucha más importancia la tracción eléctrica en los ferrocarriles, sobre todo como sistema que indica que, si la realidad de hoy tiene importancia en sí, esta es insignificante ante los horizontes que descubre.

Los 2.500 kilómetros de ferrocarriles, hoy electrificados en América, y la rapidez con que se han realizado, son un hecho de gran trascendencia que pone al descubierto un camino por el cual se irá rápidamente, en dicho país, á la electrificación de la mayor parte de los ferrocarriles, aun disponiendo de carbón á bajo precio y, por lo tanto, de fácil y económica producción de vapor; pasando el tiempo, la tracción eléctrica llegará á ser el sistema único que se impondrá por su economía, perfección y eficacia.

Es de suponer que el ejemplo de América será seguido en Europa, y como España no ha de ser una excepción por abstención, es oportuno consignar aquí algunas consideraciones respecto á la conveniencia de utilizar la energía eléctrica en los ferrocarriles españoles.

Tiene el sistema de éstos características peculiares, que plantean el problema en condiciones muy distintas á las de otros países europeos y americanos.

La orografía de España está caracterizada por grandes relieves del terreno, de los cuales, á más de la masa pirenaica, los principales constituyen cuatro sistemas de cordilleras y entre ellas están situadas tres grandes planicies que forman lo que puede llamarse la meseta central de España, cuyo nivel sobre el mar varía de 600 á 900 y más metros.

La primera y última de dichas cordilleras que están situadas á corta distancia del mar limitan con éste las partes más ricas de la Nación, debido á lo cual, y á la necesidad de comunicar el centro con el litoral, el sistema general de ferrocarriles, ó por lo menos los más importantes, se dirigen del centro á la costa, y si en el paso de las cordilleras interiores los trazados son de pendientes grandes, en las bajadas al mar aquéllas son mayores, y aun así, ha sido preciso buscar desarrollos artificiales sin más objeto que reducir la pendiente, que á su vez está limitada por la potencia de tracción de las locomotoras en uso. La única excepción es la de la cuenca del Ebro, cuya pendiente, siguiendo el río,

puede compararse con otros trazados de ferrocarriles extranjeros.

En términos generales, el criterio del trazado de nuestros ferrocarriles se ha derivado del europeo y dentro de éste más principalmente del francés, países cuya orografía, con excepciones locales, no presentan relieves que puedan siquiera compararse con los del nuestro.

¿Qué duda cabe que con mayor potencia de tracción en condiciones económicas industriales y, por consiguiente, con la posibilidad de pendientes mucho mayores en los trazados, serían éstos muy distintos de los actuales, de mucha menor longitud, de mucho menor coste de ejecución y de mejor y más potente explotación?

Queda, por lo tanto, planteado el problema en los siguientes términos:

Disponiendo de medios de tracción suficientes en potencia y no más caros que los actuales, el trazado de los ferrocarriles españoles debe hacerse en los nuevos y modificarse en los existentes, admitiendo pendientes muy superiores á las en uso, adoptando un criterio en armonía con las condiciones naturales de nuestro país, que tan distintas son de las de otros que hasta hoy hemos tomado por ejemplo.

Otro punto de vista, que es preciso tener muy en cuenta y que asimismo presenta de muy distinto modo el problema de tracción en España con relación á otros países, es el del manantial de energía. En los principales de Europa y en América del Norte las minas de carbón que lo constituyen tienen unas condiciones de producción tan favorables, en cantidad y en precio, y tan distintas de las nuestras, que ni siquiera cabe compararlas. En España disponemos de poco carbón, su calidad, con raras excepciones, no es de primera y las malas condiciones de sus yacimientos hacen que su explotación sea difícil con perjuicio de su precio de coste en boca de mina, que es, generalmente, triple que el del extranjero. (Se explotan en España minas de carbón que en otros países hulleros ni siquiera se toman en consideración.)

De lo anterior se deduce, que si es posible disponer de energía barata y en cantidad suficiente y de elementos tractores de gran potencia, se impone más que en ningún otro país un cambio rápido de orientación en la construcción y explotación de los ferrocarriles y será muy conveniente efectuar una revisión del sistema actual que justificará modificaciones fundamentales que lo mejoren, obteniéndose mucha mayor potencia en los transportes y mucha más rapidez y economía.

Puede afirmarse que en todas las grandes rampas de nuestros ferrocarriles, ó en muchas de ellas, se impone la modificación del trazado de las mismas, llegando á pendientes hasta del 5 por 100, que permitirán una reducción muy considerable de aquél, y aun en aquellas en que se debe conservar el trazado se debe establecer la tracción eléctrica.

Como solución más inmediata y fácil, podría establecerse ésta primeramente en las rampas que hoy obstruyen y reducen el tráfico, actuando aquélla como auxiliar, sin alterar para nada el sistema actual. Para ello, la locomotora eléctrica, que habría de ser de gran potencia, remolcaría á la de vapor, seguida del tren, que arrastró hasta el pie de la rampa, y quizás mejor en muchos casos colocándola á la zaga del tren, tal y como éste llegase al pie de aquélla, para que lo empujara hasta ponerlo á gran velocidad, en lo alto de la misma, y en las bajadas, anteponiéndose la locomotora eléctrica á la ordinaria, contendría la marcha del tren á la velocidad conveniente.

Cierto que para esto se precisa, á más de locomotoras eléctricas de gran potencia, energía eléctrica barata; pero no lo es menos que las dos cosas son perfectamente factibles: lo mismo

se construye una locomotora eléctrica, cualquiera que sea su capacidad, que una locomotora ordinaria que no puede pasar de ciertos límites de potencia, y en cuanto á la posibilidad de disponer de energía eléctrica barata, con los antecedentes que preceden á la vista, puede afirmarse, sin el menor riesgo de error, que no es difícil obtenerla en España á precios mucho más económicos que la equivalente de vapor producida con nuestras locomotoras actuales y aun con los que son corrientes en otros países hulleros. Es más, en los casos de tracción eléctrica, sea cualesquiera el sistema de producción de la corriente, puede nuestra Nación proveerse de ella en condiciones económicas tan ventajosas como otros países extranjeros. En las condiciones más favorables de nuestra tracción actual, la energía equivalente á un kilovatio-hora cuesta (en épocas normales) en una locomotora, por lo menos 16 céntimos de peseta, en tanto que en corriente eléctrica no costaría la tercera parte, y si se generalizara el sistema, llegando con ello á grandes consumos de energía, el precio se reduciría á menos de la cuarta parte.

En cuanto á las seguridades y rapidez del servicio, la experiencia ha demostrado que nada se puede reprochar al sistema de tracción eléctrico, que en todos los casos aventaja al de vapor, y especialmente en las grandes pendientes, sin embargo, de las cuales puede establecerse un sistema mucho más potente, rápido y eficaz, que permitirá, además, una mayor y más perfecta utilización del material móvil.

Frente á esto es sabido que, con el sistema actual, todas las rampas de más del 1 por 100, sin pasar, generalmente, de 2 por 100, constituyen, no obstante, un obstáculo que reduce considerablemente la potencia y rapidez de los transportes, así como la eficacia del material móvil por demoras inevitables.

Las ventajas señaladas para la tracción eléctrica determinarán su rápida implantación, primero como auxiliar, y después como sistema general, aun teniendo en cuenta la dificultad que supone la necesidad de invertir grandes masas de capital para el cambio total de sistema; todo será ampliamente compensado por los beneficios que la transformación ha de producir.

El sistema de tracción eléctrica auxiliar del actual que queda indicado exige, relativamente á sus ventajas, desembolsos muy reducidos, que pueden realizarlos fácilmente las Compañías actuales.

En los nuevos trazados, dentro de poco no se empleará otro sistema de tracción que el eléctrico. Razones de patriotismo y de economía nacional aconsejan igualmente evitar en lo posible ser tributarios del extranjero en el consumo del carbón necesario para la tracción.

Quizás motivos de estrategia recomienden la conservación del sistema actual, más individual y menos expuesto á interrupciones generales; pero, en todo caso, sólo como complementario para tales fines deberá mantenerse, porque, en términos generales, sería muy gravoso, bajo muchos conceptos, renunciar en las épocas de paz, por fortuna las más duraderas, á las ventajas de la tracción eléctrica, renuncia que habría de traducirse en un gran atraso nacional y en una pérdida inmensa, representada por las ventajas que la tracción eléctrica, primero como auxiliar, y después como general, ha de proporcionar á poco que aumenten las necesidades de transportes de nuestro país.

Aplicaciones electroquímicas.

Utilización de la energía eléctrica por la temperatura que permite obtener.

Señalaremos, en primer término, la aplicación á la siderurgia, que en los momentos actuales se halla en un período de

avance definitivo hacia la suplantación de todos los procedimientos en uso, de afino de hierro colado para la obtención de acero.

Hasta hoy los hornos eléctricos de fabricación de acero, no obstante los favorables resultados obtenidos, no habían pasado de una pequeña capacidad (unas 6 toneladas), y su aplicación se limitaba á la obtención de aceros especiales.

Hoy se ha dado en América y en Alemania un impulso tal á la electrosiderurgia, que puede decirse que esta parte de la metalurgia del hierro va á constituir dentro de poco el tratamiento más importante de la fabricación de acero. Ciertamente que, con excepción de países como Suecia, en que se dispone de minas ricas, energía y carbón vegetal muy baratos, por ahora no se ve el medio de evitar el primer período de la fabricación actual, ó sea el empleo del horno alto, pero no lo es menos que, aun así, la importancia de la intervención de la energía eléctrica ha de ser muy grande en la fabricación del acero.

Actualmente funciona un horno eléctrico en los Estados Unidos de 25 toneladas, que puede convertir en un día 300 toneladas de fundición del horno alto en acero de excelente calidad.

Por lo que se refiere á la dificultad del tratamiento directo de los minerales, vemos su solución muy difícil.

Un tratamiento eléctrico no evitaría el empleo del carbón necesario para la reducción del mineral; de otra parte, en términos generales, á pesar del precio normal del carbón, será muy difícil obtener calorías más baratas con la energía eléctrica; así, pues, en cuanto del calor se haga una buena utilización, como ocurre en el horno alto, tanto en la deshidratación del mineral y castina, como en el calentamiento de estos materiales hasta el punto de fusión, difícilmente se llegará á una solución favorable con energía eléctrica, por bajo que sea su precio de coste.

Sólo en condiciones especiales de baratura del mineral, de la energía eléctrica y donde sea difícil proveerse de carbón, por razón de reducir el consumo de éste al minimum, podrá intentarse la solución Sueca del Horno alto eléctrico, en el cual, el consumo de carbón es un tercio del correspondiente al del Horno alto ordinario.

La ventaja de la energía eléctrica consiste en la posibilidad de alcanzar con ella temperaturas ó potencial calórico muy elevados, con relación á los que partiendo de la combustión del carbón pueden obtenerse en los hornos más perfectos. De esto resulta que, en cuantas operaciones sea preciso ó conveniente una gran temperatura, la energía eléctrica tiene una aplicación indicadísima. Por lo que toca al afino del hierro, partiendo de la fundición del horno alto, puede obtenerse un acero de excelente calidad, sometiendo aquella durante dos horas á la temperatura de 1.600 á 1.700 grados centígrados, que fácilmente, y aun mucho mayor, puede obtenerse en horno eléctrico, dentro del cual la temperatura del arco se aproxima á 4.000.

En los procedimientos generalizados hasta hoy no pueden obtenerse, por falta de temperatura, productos tan puros, no obstante los artificios empleados y el gran consumo de combustible unido á un tratamiento mucho más largo, que limita ó reduce la capacidad de producción y que, por otro lado, sólo son aplicables á las fundiciones de hierro obtenidas de minerales ricos y de composición determinada. Puede combinarse el tratamiento en horno eléctrico, con otro previo en el Besemer ó Thomas, con objeto de hacer una rápida y perfecta purificación de la colada de acero procedente de aquéllos.

J. URRUTIA.

(Continuará.)

