

Las primeras alternativas en la electrificación de los ferrocarriles de vía ancha en España (1907-1930)

Domingo Cuéllar (dcuellar@ffe.es) y Ramón Méndez (mandres_picazo@hotmail.com)

Museo del Ferrocarril de Madrid

Resumen

Este texto hace un recorrido por la evolución de los primeros años de la tracción ferroviaria, desde la perspectiva de la elección del sistema que era más apropiado. Esta discusión, en cierto modo continuación de la “batalla de los sistemas” que tuvo lugar entre Corriente Alterna y Corriente Continua (AC-DC), aportó una importante información técnica que se analiza y permite explicar cuáles fueron los motivos que llevaron a que unos países optaran por la tracción en corriente continua y otros en corriente alterna monofásica.

España también estuvo presente en ese debate y la discusión acerca de esa elección nos ofrece la posibilidad de conocer un interesante capítulo de la historia ferroviaria de nuestro país.

Palabras clave

Electrificación de Ferrocarriles, Corriente Continua, Corriente Alterna Trifásica, Corriente Alterna Monofásica

Abstract

This text makes a journey through the evolution of the early years of railway traction, from the perspective of the best approach was more appropriate. This discussion, then somehow the "battle of the systems" that took place between AC and DC Power, provides an important technical information that is analyzed and can explain what were the reasons that led some countries to opt for traction in direct current and other in single-phase alternating current.

Spain was also present at that debate and discussion about this election offers us the chance to meet an interesting chapter in railway history of our country.

Keywords

Railway Electrification, , Direct Current, PolyPhase AC, Single-Phase AC

Introducción

Rosenberg tomó como ejemplo lo acaecido con la llegada de la electricidad para explicar la obligada etapa de incertidumbre a la que se debe enfrentar cualquier nueva tecnología¹. Y es que la electricidad, como una forma de energía innovadora, constituyó un ejemplo paradigmático durante el siglo XIX de las singulares relaciones que siempre han existido entre la ciencia y la tecnología. Tal y como recogían Derry y Williams, la mayor parte de los adelantos tecnológicos de la humanidad tuvieron lugar a partir de una serie de descubrimientos empíricos que tenían un finalidad práctica, habiendo sido mayores las aportaciones de la tecnología a la ciencia que no al revés². Es cierto, y si tal y como sugiere Gille, la ciencia tiene como objetivo la comprensión, mientras que la tecnología busca más la utilización³, podemos entender que con la llegada de un buen número de las invenciones e innovaciones de la Revolución Industrial, y entre ellas la electricidad, constatamos cómo éstas fueron consecuencia directa de investigaciones científicas, en primer lugar, más que de aplicaciones tecnológicas, como había sido habitual en el periodo protoindustrial. Así, en los descubrimientos en los que la ciencia lleva a cabo la invención podemos precisar con seguridad el momento: en nuestro caso, casi todos los especialistas recogen la invención de la dinamo por parte de Faraday, el 24 de noviembre de 1831, como fecha clave⁴.

En ese momento, el ferrocarril llevaba una andadura corta y titubeante. Apoyado en la revolución arrolladora de la máquina de vapor, el ferrocarril –personalizado en la locomotora de vapor– conquistó espacios urbanos, industriales y rurales. Su historia es suficientemente conocida y no es necesario ahondar en ella. Sin embargo, sí hay que recordar que el desarrollo del ferrocarril, basado en la tracción vapor, tenía unos límites claros que se fueron haciendo más significativos conforme se expandía. Estos límites los podemos concretar en tres aspectos: tecnológico, la seguridad y económico.

En el aspecto técnico, hemos de indicar que la locomotora de vapor había tenido una evolución muy significativa desde que Trevithick y Stephenson pusieran a rodar sus primeros modelos. Una locomotora de vapor de finales del siglo XIX seguía teniendo los fundamentos básicos de la *Rocket*, pero había desarrollado una serie de innovaciones que multiplicaron exponencialmente sus capacidades y virtudes⁵. Sin embargo, la locomotora de vapor precisaba de un mantenimiento muy intensivo y costoso, y aun así los problemas de fiabilidad eran muy frecuentes. Creemos que existía un techo técnico que hacía que cada las mejoras fueran menos significativas y el esfuerzo para conseguirlas mayor.

Por otro lado, la llegada del ferrocarril a las ciudades, cada vez más pobladas, trajo consigo problemas asociados a la seguridad e higiene, de los que se consideraba

¹ Rosenberg (1994).

² Derry y Williams (1987), p. 893.

³ Gille (1978), p. 112.

⁴ Un relato de la secuencia de invenciones e innovaciones de la electricidad, Derry y Williams (1987), pp. 893-936.

⁵ Entre otros, en el excelente manual técnico de Silvio Rahola (1915) se pueden conocer todos los detalles técnicos de las locomotoras de vapor, sus características y principales transformaciones antes de la década de 1930.

culpable al sistema ferroviario, en general, y a la tracción vapor, en particular. Tal y como se ha demostrado, el espacio ferroviario pasaría progresivamente de ser un lugar emblemático y de cierto privilegio en los comienzos de la era ferroviaria a ser percibido como un espacio deteriorado y fronterizo⁶.

Finalmente, y además de los elevados costes de mantenimiento que ya hemos citado, la tracción vapor estaba condicionada por su dependencia de una fuente de energía como el carbón que no era universal, que ya presentaba ciertos problemas de distribución y que cuyo precio era especialmente sensible a la situación internacional y a las coyunturas económicas. Por lo que ya desde el siglo XIX, muchos países buscaban otras fuentes de energía para aplicar su revolución industrial. Un buen ejemplo de esto sería el caso catalán, que, ante la carestía y escasez de carbón, optó por recuperar las ventajas de la rueda hidráulica y mover buena parte de sus telares con la energía de las turbinas y no con carbón. Además, como se vio durante la Primera Guerra Mundial, la escasez y encarecimiento de los precios del carbón provocaron graves problemas en todo el mundo, pero especialmente en los países más dependientes.

Estas razones hicieron que diferentes científicos y empresas afrontaran de modo, en muchas ocasiones paralelo, la búsqueda de nuevas formas de energía que superaran esas vicisitudes. Sin embargo, el proceso que llevaría desde el descubrimiento de Faraday hasta la implantación de un sistema fiable de tracción eléctrica en los ferrocarriles sería largo y estaría plagado de problemas. El cambio tecnológico tuvo lugar de un modo progresivo, en forma de pequeños pasos que vencían inconvenientes y problemas, pero también de modo irregular, haciendo un proceso de selección y mutación con una cierta naturaleza biológica⁷.

En realidad, ya en 1835 se registró en Vermont (Estados Unidos) la construcción de unos primitivos automotores eléctricos con acumuladores (baterías). También a partir de la energía proporcionada por unas primitivas baterías de hierro y cinc, Davidson llevó a cabo en 1842 entre Edimburgo y Glasgow una prueba para mover un coche de ferrocarril de dos ejes⁸. Todo todavía muy experimental, ya que mientras sólo se utilizara energía procedente de baterías, debido a sus dimensiones y a su elevado coste, la locomotora de vapor seguiría siendo mucho más eficiente y rentable, lo que necesariamente provocaría en ese momento un enfriamiento de las expectativas levantadas con las primeras iniciativas⁹.

No obstante, los primeros pasos de la electrificación superaron con cierta celeridad la posibilidad de arrastrar vehículos de escaso tonelaje y de ahí su aplicación rápida en los tranvías urbanos, pero las necesidades de flujo eléctrico eran mucho mayores en el transporte de grandes cargas y, al finalizar el siglo XIX, la tracción eléctrica se encontraba en un punto muerto similar al que tuvo la expansión ferroviaria antes de la fabricación de carriles de acero en los convertidores Bessemer. La invención del convertidor rotativo cambió la historia: la corriente alterna en las tensiones necesarias podía ser transportada a grandes distancias hasta subestaciones de distribución y

⁶ Santos y Ganges (2007).

⁷ Sobre este enfoque, Mokyr (1993), pp. 339-371.

⁸ Valentí (1918), p. 7.

⁹ Mokyr (1993), p. 158.

transformación, donde se modificaba a baja tensión para usos industriales y domésticos¹⁰.

También había sido importante la construcción de generadores (dinamos) eléctricos eficaces en coste y rendimiento que permitieron pasar de la fase experimental (Faraday) a la industrial (Gramme). A partir de 1870, este último inventor consiguió poner en marcha de modo exitoso una dinamo autoexcitable –que ya llevaban unos años de pruebas- con un inducido que no se calentaba y se alimentaba por una máquina de vapor¹¹. Esta dinamo sería mejorada inmediatamente por Siemens-Halske con un sistema de inducido de tambor, que terminaría imponiéndose, y con el que esta pareja de ingenieros-empresarios alemanes llevaron a cabo la que se ha considerado la primera exhibición exitosa de un tren eléctrico, en la Exposición Industrial de Berlín de 1879.

A partir de ese momento, las innovaciones tomarían velocidad y se sucederían unas a otras. Así, el célebre Edison, en 1880 en New Jersey, y nuevamente, Siemens-Halske en París (1881) y Viena (1885), llevaron a cabo nuevas demostraciones, utilizando ya en estos últimos casos, un cable aéreo para la toma de corriente, que se realizaba, como en el caso de Edison, todavía desde dinamos generadoras¹².

En las dos décadas finales del siglo XIX, la tracción eléctrica ferroviaria ya estaba en las calles de las principales ciudades del mundo mediante la construcción de tranvías, sin embargo, para conseguir una aplicación exitosa a los ferrocarriles convencionales, mucho más pesados y con unos recorridos mayores, todavía habría que esperar. Aunque no mucho.

En la Exposición de Chicago de 1893, nuevamente Siemens y Halske expusieron un motor trifásico de 600V y 50Hz que con alimentación externa y continuada podía arrastrar pesados convoyes. Esa alimentación externa, hasta entonces no lograda, era mucho más posible desde que Tesla había divulgado una manera exitosa de transportar corriente alterna en alta tensión a grandes distancias, sin pérdidas de energía importantes como ocurría con la corriente continua. Además, en 1895, la compañía ferroviaria de Baltimore a Ohio realizó la electrificación del túnel de la línea del *Baltimore Belt*, en la que prestarían servicio cinco locomotoras de 1.054 CV para remolcar toda clase de trenes de viajeros y mercancías. Se había llevado a cabo la primera obra de electrificación ferroviaria propiamente dicha.

Batallas y disputas en torno a la electrificación de los ferrocarriles

Como hemos visto, los inventos e innovaciones eléctricos en el último cuarto de siglo XIX fueron constantes: bombillas, motores, transformadores y otros muchos cambiaron completamente las aplicaciones, y sus resultados, de la electricidad en la vida cotidiana e industrial. Pero ese periodo fue también fundamental para la resolución del conflicto técnico-empresarial planteado entre las ventajas-inconvenientes de la corriente continua (DC) y la corriente alterna (AC); los dos sistemas que respectivamente habían desarrollado a través de sus empresas Thomas A. Edison y George Westinghouse.

¹⁰ Prout (1921), pp. 164-165

¹¹ Derry y Williams (1987), pp. 903-904.

¹² Valentí (1918), p. 7.

Este episodio ya fue conocido en la época como “la batalla de los sistemas”, expresión que recogía la disputa agresiva y violenta que tuvieron Westinghouse y Edison por la supremacía de las respectivas tecnologías eléctricas que ambos defendían. Por supuesto, la batalla tuvo muchas aristas que transcendían a lo técnico, ya que desde este punto de vista ambos habían resuelto los principales problemas que se habían planteado para su desarrollo y economía; pero el control del mercado, desde unos parámetros extremadamente competitivos, resultó muy apetecible para ambos. El biógrafo de Westinghouse, tras la muerte de este último, describió con claridad lo que había ocurrido entre ellos en las últimas décadas del siglo XIX:

“Westinghouse y Edison vieron cada uno al otro incendiando y matando sus conciudadanos inocentes, pero es totalmente justo decir que de parte de Westinghouse esta lucha era defensiva”¹³.

El escenario de lucha en los tribunales que se planteó entre ambos innovadores-empresarios se convirtió en un espectáculo mediático de una gran resonancia en todo el mundo¹⁴. La resolución técnica del conflicto llegaría en torno a 1890, cuando Tesla construyó un motor polifásico de corriente alterna y Gaulard hizo lo propio con un renovado transformador. Los dos aparatos fueron perfeccionados por los talleres de Westinghouse por lo que se superaban los problemas de la corriente alterna en la producción, ya que los de transporte habían sido vencidos anteriormente por el propio Tesla¹⁵. Además, también se pudo comprobar que los motores de corriente continua podían también funcionar en corriente alterna si los núcleos de los inductores y del inducido cumplían con unas características técnicas¹⁶. Todo esto dio como resultado que la corriente alterna superara a la continua en el uso común, en ciudades e industrias y se diera por finalizado este episodio.

La aplicación de la electricidad a los ferrocarriles en el primer tercio del siglo XX tuvo que superar también importantes pruebas tecnológicas y económicas, también rodeadas de un amplio debate, aunque sin la violencia que había rodeado las disputas iniciales entre Edison y Westinghouse. Ambos sistemas establecieron nuevamente una intensa rivalidad y las dos empresas, General Electric Company y Westinghouse Company, llevarían a cabo importantes trabajos, aunque ya no eran los únicos, puesto que la empresa europea (especialmente los suizos y alemanes) tendrían un significativo protagonismo¹⁷. Si bien, previa a esta elección, la tracción de los ferrocarriles se analizó sobre las ventajas que la tracción eléctrica debía traer sobre la tracción vapor, lo que también fue objeto de amplios estudios y modelizaciones sobre la eficiencia de uno y otro modo de tracción.

¹³ Prout (1921), p. 162.

¹⁴ Véase David (1991), pp. 86-87.

¹⁵ Mokyr (1993), p. 161, y Hausman, Neufeld y Wilkins (2008). Hemos visto que poco después, Siemens-Halske ya habían perfeccionado aún más ese motor.

¹⁶ Westinghouse (1911), p. 74.

¹⁷ La lista sería muy numerosa, pero podemos citar entre otras a Brown, Boveri & Cie. (BBC), Maschinenfabrik Oerlikon (MFO), Metropolitan Vickers Electrical Export Co. (Metrvick), Société Anonyme des Ateliers de Secheron (Secheron), Société Suisse pour la Construction de Locomotives (la Suisse), la Société Alsacienne de Constructions Mécaniques et la Compagnie française Thomson-Houston (Alstom) o Siemens & Halske AG.

1.1. Tracción vapor vs tracción eléctrica

Respecto a las ventajas e inconvenientes que presentaba la sustitución de la tracción vapor por la tracción eléctrica, hemos de decir que estos apartados fueron objeto de intensos debates, especialmente por parte de los Cuerpos de Ingenieros Industriales y de Caminos que tuvieron un protagonismo muy significativo, ya que cuando se estaba discutiendo la viabilidad de uno y otro modelo, también se planteaban las líneas básicas de la planificación futura de las electrificaciones ferroviarias. Esto fue común en prácticamente todos los países, y las comisiones creadas al efecto o la celebración de concursos científicos de ideas llenaron muchas páginas, tanto de revistas especializadas como de la prensa cotidiana. En el caso español, este debate fue especialmente intenso en las décadas de 1910 y 1920, solapándose con el propio de la planificación de las electrificaciones, que debería haber sido posterior, una vez hubiera salido triunfante la opción eléctrica. Sin embargo, las coyunturas económica y política de nuestro país en ese momento no cerraron completamente el tema, y aún es posible encontrar en las décadas de la Autarquía Franquista la misma discusión¹⁸.

Las aportaciones más relevantes son de la década de 1910, momento en el que el Colegio de Ingenieros Industriales realizó un concurso para recabar ideas sobre la mejor ordenación para llevar a cabo la electrificación de los ferrocarriles en España, tal y como se estaba haciendo en otros países europeos en ese momento¹⁹.

Estos autores resaltaban las ventajas sobre los inconvenientes, subdividiendo aquéllas en dos clases: técnicas y económico-financieras²⁰. De las primeras, se resaltaban a su vez media docena de mejorías que habría de propiciar la electrificación, como la mayor capacidad de tráfico, mayores velocidades posibles y mejor utilización del material de tracción y móvil. También era importante tener en cuenta que la conducción no precisaba de tanto personal y, además, mediante el sistema de mando múltiple era posible la conducción telemandada con un solo maquinista. Esto se completaba con una mayor sencillez de los mecanismos, lo que agilizaba el mantenimiento y también la seguridad, tanto de los trabajadores, como de los usuarios, ya que se eliminaba el riesgo de asfixia en los túneles.

Las ventajas económico-financieras se agrupaban en tres ideas. En lo concerniente a la inversión en capital social fijo, se consideraba que ya que se podían elegir trazados con mayores rampas en los ferrocarriles de nueva construcción o de evitar las

¹⁸ Jiménez Ontiveros (1941) y González Bueno (1945). De hecho, dos peculiaridades de nuestros ferrocarriles en este sentido en las décadas de 1950-1960 explican en parte esas dudas, derivadas, sobre todo, de la falta de recursos económicos: la tracción vapor tendrá en España un tardío esplendor en esas décadas y la sustitución final del vapor se terminará haciendo en buena parte de la red por la tracción diésel, no por la eléctrica. Esto pasó también en algunos países, como en buena parte de Estados Unidos, pero por motivos muy distintos: la etapa del petróleo barato.

¹⁹ Entre otros, se pueden consultar los trabajos de Valentí, Viani, Sánchez Cuervo... Como veremos más adelante, cuando se publican estos opúsculos, además de algunas líneas de vía estrecha en País Vasco, Navarra y Cataluña, se había abierto al servicio el tramo de Santa Fe a Gérgal, en la línea de Linares a Almería (1912), y se había decidido la electrificación de la rampa de Pajares, entre Ujo y Busdongo, para facilitar la salida de los carbones asturianos.

²⁰ Es evidente que se trataba de una discusión artificial, ya que con los simples datos apenas si habría debate, pero es indudable que los ingenieros, muchos de ellos empresarios o empleados en negocios relacionados con la expansión eléctrica, debían generar opinión ante la clase política.

modificaciones en los ya construidos, se podían compensar las inversiones en las instalaciones eléctricas con estos ahorros.

Donde resultaba más evidente la economía de la tracción eléctrica era en la reducción de gastos de mantenimiento y de personal, tanto en el personal de conducción, como de taller, como, incluso, del personal de vía, ya que el menor tonelaje por eje de estas locomotoras, con una potencia notablemente mayor, conservaba en mejor estado la vía. En los gastos de explotación también era evidente que la energía eléctrica salía más económica que quemar carbón en las calderas de las locomotoras, aunque una parte de esa energía viniera de centrales térmicas. Los datos, a pesar de la profusión de estudios, no son del todo lo concretos que podríamos esperar, pero dependiendo de las características orográficas de las líneas electrificadas y de la intensidad del tráfico, las economías oscilaban entre el 30-70%. En todo caso, la entrada de las economías de escala permitía que la horquilla del ahorro se aproximara a los valores máximos²¹.

Por último, la electrificación debería llevar aparejados el incremento del tráfico y el aumento de los ingresos, debido a la ampliación de la capacidad de la línea, al disminuir los tiempos de marcha de los trenes. Seguramente aquí estaba el gran talón de Aquiles de la electrificación de nuestros ferrocarriles: el escaso tráfico.

Con respecto a los inconvenientes, se señalaban aquellas de carácter económico, como el casi inevitable incremento de la carga financiera para las empresas o el Estado, y la obligada inversión en la construcción de una red eléctrica de carácter nacional. Desde el punto de vista técnico se argumentaba la no intercambiabilidad entre las locomotoras de distintos sistemas y el progreso constante de la tracción vapor²². Además, siempre se solía apuntar a la vulnerabilidad de las instalaciones de la electrificación a guerras o atentados para que, desde la Defensa nacional se plantearan inconvenientes a su desarrollo²³.

1.2. La “batalla ferroviaria” de los sistemas

La batalla ferroviaria de los sistemas fue, como hemos señalado, menos agresiva que la eléctrica general, y se restringió mucho más a los aspectos técnicos de cada sistema y a la capacidad de los grupos empresariales de ejercer su influencia sobre las decisiones de las compañías ferroviarias o de los propios Estados, ya que en muchas ocasiones fue la planificación pública y su apoyo financiero la que llevaría a cabo estas electrificaciones ferroviarias. En pleno debate español, uno de los especialistas interesados, apuntaba de forma tajante que

²¹ En Hausman, Neufeld y Wilkins (2008, p. 515), también se dan unas cifras parecidas, dada la amplitud de la horquilla planteada: 7-35 céntimos de franco por kilómetro-tren en tracción eléctrica por los 23-39 céntimos de franco por kilómetro-tren en tracción vapor.

²² Esto último, ha sido resaltado como habitual por parte de algunos especialistas de historia de la tecnología, ya que la vieja tecnología suele tener sus últimas mejoras ante la aparición de una tecnología nueva preparada para sustituirla. Véase Mokyr (1993).

²³ Uno de los mayores especialistas en la materia, Mario Viani, ya como Subdirector de RENFE, analizó desde el punto de vista militar las características que debían tener las subestaciones y tendido aéreo para evitar esos sabotajes, Viani (1945). No era sólo una preocupación del estamento militar español, también en Francia, tal y como señala Bouneau, donde el Estado Mayor, ante la imposibilidad de impedir la electrificación de las líneas centrales y meridionales, al menos planteaba que no se hiciera en el mismo sistema que el “enemigo alemán”, apostando por la corriente continua, Bouneau (2008), p. 394.

“... la batalla de los sistemas es solamente un fantasma, una creación de la fantasía, pues en realidad se trata, no de adoptar o rechazar un sistema, sino de escoger los aparatos y maquinaria que mejor satisfacen las condiciones del servicio en cada caso”²⁴.

A la altura de 1920, una vez que se tenían las primeras experiencias reales y se había procedido al registro correspondiente de patentes e innovaciones, los sistemas de corriente que se encontraban en disputa para considerar cual de ellos era más apropiado para la tracción ferroviaria eran tres²⁵:

1. Corriente Continua con línea aérea de alimentación y tensiones hasta de 3kV²⁶.
2. Corriente Alterna trifásica con línea aérea de alimentación, tensiones de 5kV a 8kV entre fases y una frecuencia de 15 a 50Hz.
3. Corriente Alterna monofásica con línea aérea de alimentación, tensiones de hasta 15kV y frecuencias de 15 a 25Hz.

Desde un punto de vista puramente técnico todos los sistemas habían llegado, en mayor o menor medida, a un estado de eficiencia adecuado para aportar los esfuerzos de tracción y potencia necesarios para arrastrar largos y pesados trenes, superando claramente a las capacidades de las locomotoras de vapor²⁷.

El propio Westinghouse era explícito sobre esto:

“Los tres tipos de locomotoras eléctricas considerados funcionan hoy día con resultado completamente satisfactorio y han demostrado su utilidad, capacidad y seguridad para la tracción de los ferrocarriles”²⁸.

Las diferencias venían del menor peso de las locomotoras trifásicas sobre las monofásicas y las de corriente continua. Estas dos tenían un peso similar ya que se compensaba la presencia de transformadores en las alternas con el menor peso de los motores de tracción que portaban²⁹

²⁴ Sánchez Cuervo (1919), p. 449. Era un argumento que, incluso, podía aplicarse a sí mismo, puesto que sus argumentos en defensa de la Corriente Continua muchas veces parecían forzados.

²⁵ Estas tres opciones ya habían sido puestas de manifiesto en 1911 por Westinghouse, que hablaba de: 1) Corriente continua con alimentación aérea o con sistema de tres carriles en el que se hace uso de la corriente alterna para la producción y transporte de la energía, cuando la central está situada a una distancia muy considerable del ferrocarril; 2) Corriente trifásica y dos conductores de trabajo; y 3) Corriente monofásica de alta tensión y un solo conductor de trabajo. Westinghouse (1911), p. 75.

²⁶ Habría que dividir, tal vez, la Corriente Continua en dos tipos, derivados de la forma de alimentación: bien a través de la línea aérea o bien a través de tercer carril que se utilizaba normalmente para tensiones aún más bajas (menos de 0'8kV).

²⁷ El concepto de esfuerzo de tracción tiene un grado más de precisión que el de potencia. Éste calcula la cantidad de energía que es capaz de producir una máquina (y se mide en CV, HP o kWh, entre otros), mientras que el esfuerzo de tracción estima la cantidad de energía (medida en kg) que tiene que desarrollar una máquina (una locomotora de ferrocarril en este caso) para vencer la resistencia del peso, la longitud y la pendiente de un tren (peso adherente). Se considera que se necesitan 5 kg por tonelada en vía horizontal, aumentando 1 kg por cada tonelada y por cada milésima de inclinación. Véase González y Sastre (1887), y Rahola (1915), pp. 86-88.

²⁸ Westinghouse (1911), p. 76.

²⁹ Cuando Tesla demostró la viabilidad y ventajas del transporte a gran distancia, sin apenas pérdida de energía, en la Corriente Alterna Trifásica sobre la Corriente Continua, casi todas las redes de suministro optaron por ese sistema. Además la mayor parte de los motores industriales eran también trifásicos, por lo

Otras condiciones técnicas que afectaban a la tracción ferroviaria en los distintos sistemas tenían que ver con los consumos y prestaciones en el arranque, momento fundamental para mejorar los tiempos de viaje, donde las continuas se comportaban mejor que las monofásicas y trifásicas, donde las caídas de tensión ocasionaban graves problemas para poder alcanzar la velocidad prestablecida. El menor consumo estaba en las locomotoras monofásicas, aunque no había grandes diferencias. Por último, en este apartado era importante señalar que la mayor capacidad para recuperar tiempo perdido estaba en las locomotoras monofásicas, seguidas de las continuas, mientras las trifásicas tenían grandes dificultades, ya que su sistema de velocidad constante era poco favorable para esta necesidad, tan importante en los trenes de viajeros, sobre todo.

Este análisis no ofrecía grandes diferencias entre los tres tipos de sistemas, ni en los pesos, ni en el rendimiento ni en las mejoras en el consumo. También el llamado freno de recuperación era posible en los tres sistemas, aun cuando en los trifásicos estaba mucho más desarrollado, lo que explica porque muchas compañías con líneas en zonas montañosas optaban por instalar este sistema, ya que la posibilidad de generar corriente (cuando los motores de tracción invierten su polaridad para convertirse en generadores) en los trenes descendentes para entregarla a los trenes ascendentes era realmente significativa. Además, este sistema fue el primero que desarrolló esa capacidad de disponer de freno de recuperación, que a continuación se aplicó a los ferrocarriles en corriente continua y más tarde, ya en la tercera década del siglo XX, a los monofásicos³⁰.

Otra cuestión técnica, que fue bastante debatida y generó algunas dudas, era la mayor incidencia que tenían las corrientes alternas (trifásica y monofásica) sobre la estabilidad de las líneas auxiliares que se alimentaban de corrientes débiles, como el telégrafo, el teléfono y las señales, a los que causaban algunas interferencias, lo que obligaba a su desvío y reinstalación³¹.

Tampoco era especialmente diferente la inversión que se necesitaba para la puesta en marcha de los tres sistemas. Los gastos de primer establecimiento eran algo menores en el sistema monofásico, que combinaba la sencillez del tendido aéreo con la economía de los motores y de las propias subestaciones, mientras que en el sistema trifásico había que tener en cuenta una mayor inversión en la superestructura, por la duplicación del cable aéreo, si bien no eran necesarias subestaciones transformadoras, si acaso transformadores de potencial para evitar las caídas de tensión más habituales en los sistemas alternos (monofásico y trifásico). Sin embargo, estas grandes subestaciones, provistas de máquinas rotatorias eran ineludibles en el caso del sistema continuo. En este último, se podía reducir el gasto en subestaciones si se utilizaban tensiones elevadas (3kV), que disminuían el número de estas centrales a la mitad sobre las líneas

que sólo era necesaria la instalación de transformadores estáticos para reducir el voltaje. Sin embargo, cuando la red de suministro ferroviario era de Corriente Continua, se precisaron durante mucho tiempo pesados convertidores (máquinas rotatorias) para la conversión de la corriente.

³⁰ En este punto hay que hacer una distinción entre el freno eléctrico de recuperación, que hemos explicado, y el freno eléctrico reostático, donde la energía liberada en el descenso se disipa a través de resistencias. Esto también resultaba muy ventajoso, por el menor desgaste que sufrían los elementos mecánicos del frenado neumático.

³¹ Algunos autores, Sánchez Cuervo (1919), p. 451, calificaban de amenaza para los circuitos telegráficos y telefónicos instalados a lo largo de la vía la instalación del sistema monofásico.

con tensiones de 1'5kV. En los gastos de explotación, no había grandes diferencias entre los tres sistemas, si bien, algunos autores planteaban un mayor grado de eficiencia en el sistema monofásico³².

Aunque su visión estaba sesgada, los datos aportados por Westinghouse pueden ser interesantes de recoger, ya que según su estimación, tanto para los gastos de instalación como de explotación, el sistema monofásico que su compañía defendía era un 21% más económico que el continuo y un 10% más que el trifásico. Seguramente las diferencias estaban algo infladas, pero aun así en su aportación se recogía que el sistema monofásico era más caro en el material de tracción, tanto en su compra como en su mantenimiento y en los trabajos de instalación de la central de producción de energía, mientras que el sistema continuo se encarecía sobre todo en las líneas de transporte y subestaciones y el consiguiente coste de la energía durante la explotación³³.

En resumen, las diferencias técnicas y económicas entre los tres sistemas no eran muy grandes, y ello es precisamente lo que hizo posible la coexistencia de criterios diametralmente opuestos al examinar la cuestión, y el que en todos los países se discutiera este tema con verdadero apasionamiento. Estas pequeñas diferencias resultan a veces aumentadas por las circunstancias especiales de cada caso, y ello hacer ver la dificultad de la unificación de sistemas, no ya en un continente, sino dentro de un país o una región algo extensa³⁴.

En lo referido a la rentabilidad según el tráfico y el perfil de la línea, se consideraba que en aquéllas de gran longitud en las que no era fácil establecer centros de distribución de energía en forma radial, y en el que la continuidad de las pendientes no admitía recuperaciones, con una densidad de tráfico baja o moderada, el sistema adecuado era el monofásico³⁵.

Cuando el tráfico era muy intenso, sea cual fuera la extensión de la red y si no había buenas condiciones para el funcionamiento del freno de recuperación (por ejemplo, que no se hubiera instalado en las subestaciones distribuidoras), el sistema continuo era el indicado para la electrificación, ya que no conviene olvidar que en lo concerniente al material de tracción automotor, específico para viajeros, y no a las locomotoras, tanto de viajeros como de mercancías, se adaptaba perfectamente, aunque posteriormente el sistema monofásico también solucionaría la cuestión³⁶.

La respuesta que daba cada uno de estos motores a la variación de la carga o de la rampa también fue muy importante. Así, los motores trifásicos son de velocidad constante, independientemente de las variables anteriores; es decir, no aumentan su

³² Armstrong (1913), table VIII, p. 1288.

³³ Westinghouse (1911), p. 91, gráficos 6 y 7.

³⁴ Es ineludible pensar en aquellas cuestiones sobre la oportunidad y el control del mercado que ha analizado la historia económica, a raíz de otras polémicas en el predominio de la tecnología. Paul David es quien más ampliamente ha estudiado esto, David (1985) y (1990), y David y Bunn (1988).

³⁵ Este argumento fue el que utilizó, como veremos más adelante, Valentí (1918) para defender la instalación del sistema monofásico en España

³⁶ Aquí podemos encontrar otra explicación lógica para entender que el sistema de corriente continua se impusiera en buena parte de los tráficos urbanos y suburbanos de Europa y Estados Unidos, ya que las características –peso, dimensiones y coste- de los motores monofásicos no eran adecuados para unidades automotoras que destinaban el mayor espacio disponible para la ubicación de los viajeros.

velocidad en los tramos horizontales o la disminuyen por incremento de la carga a arrastrar, sólo disminuyen o aumentan su consumo en base a esos cambios. Por su parte, los motores continuos responden de modo uniforme al cambio de esas variables, dado que el voltaje con el que trabajan es constante, de este modo, lo que provoca que ralentice su marcha por rampas o por aumento de carga, lo acelera en los tramos horizontales o con menos carga. Por último, los motores monofásicos combinan esas características y sí pueden aumentar y disminuir velocidad cambiando el potencial de entrada, y no por poco tiempo como ocurre con los motores continuos³⁷.

En el sentido opuesto, para líneas de fuertes pendientes, siempre que éstas tuvieran continuidad y no hubiera contrapendientes, dominadas por tráfico de mercancías de gran tonelaje, las prestaciones de la tracción trifásica no ofrecían discusión, al menos hasta el comienzo de la década de 1920, puesto que se sacrificaba la velocidad, por la regularidad y fiabilidad que ofrecían las locomotoras trifásicas³⁸.

El sistema trifásico se descartaría pronto, en muchos países, como posible alternativa debido a su complicación técnica y de explotación, y al elevado coste de instalación de la línea aérea. Además, si no existían líneas de prolongadas y complicadas pendientes su utilidad era todavía menor³⁹. Sólo Italia mantendrá sus líneas trifásicas durante bastante tiempo, aprovechando las ventajas que sí ofrecía este sistema para adaptar rápidamente las producciones en alta tensión que llegaban desde las centrales hidroeléctricas, que sólo precisaban de transformadores estáticos para rebajar la tensión a la de trabajo de los motores, habitualmente por debajo de 0'6kV.

Si observamos la diversidad de sistemas de las primeras electrificaciones realizadas en el mundo antes de la Primera Guerra Mundial (Anexo 1), vemos que las primeras instalaciones, a finales del siglo XIX, se hicieron en Corriente Continua, preferentemente en Estados Unidos, donde General Electric (la empresa de Edison) tuvo mayores logros y terminó imponiéndose. Sin embargo, en lo que respecta a la electrificación monofásica, que llegó unos quince años más tarde, tendría una evolución inversa, con un gran dominio de nuevas construcciones en Estados Unidos, con líneas de largo recorrido que constituyeron ejes de comunicación importantes como el Indianápolis-Cincinnati o el New York-New Haven. Desde 1908-1909, ya sería Europa la que asumiría la construcción con este sistema, especialmente en los países germánicos centroeuropeos. Intercalado en este desarrollo, la electrificación trifásica se centró sólo en Suiza e Italia, donde el efecto red de difusión tecnológica y empresarial fue evidente: sobre todo Brown Boveri y Secheron serían las empresas productoras⁴⁰.

Unos decenios más tarde, y en la escala europea (Gráfico 1), el panorama de la distribución de los sistemas corriente aplicados a la electrificación de los ferrocarriles es bastante claro, con un reparto territorial bastante equitativo entre los países que optaron por el sistema monofásico (Suiza, Alemania y Suecia) y los que eligieron el continuo

³⁷ Westinghouse (1911), pp. 75-76.

³⁸ Sánchez Cuervo (1919), p. 449.

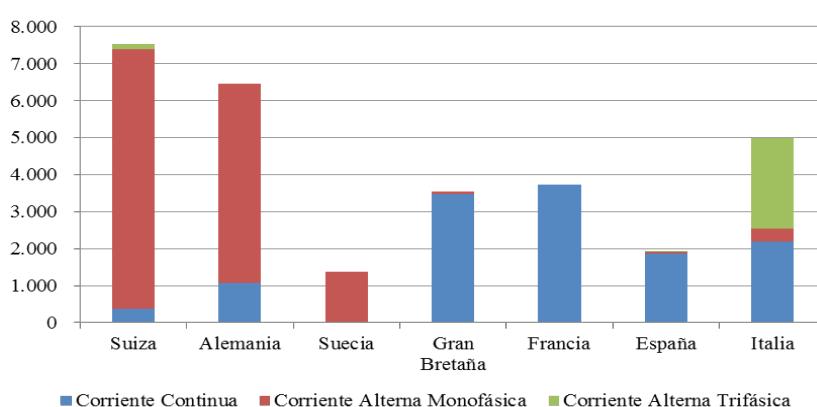
³⁹ Según Valentí (1918) ésta fue la razón última de su no aplicación en Estados Unidos.

⁴⁰ Poco antes de comenzar la Segunda Guerra Mundial se habían electrificado en todo el mundo 42.050 km de ferrocarriles de los que 24.440 km lo habían sido en corriente continua (58%), 15.370 km en corriente alterna monofásica (37%), y 2.240 en corriente alterna trifásica (5%), Machefer-Tassin, Nouvion y Womant (1980), p. 522.

(Gran Bretaña, Francia, España e Italia), con la salvedad de que este último país mantuvo una importante red trifásica hasta la década de 1960. En términos cuantitativos, sin embargo, los países monofásicos fueron mucho más activos, especialmente por las dimensiones de la red alemana y por la apuesta completa de las redes suiza y sueca que electrificar la mayor parte de sus ferrocarriles. En el otro lado, ingleses, franceses y españoles tuvieron unos porcentajes de electrificación sobre el total de la red bastante bajos (10-15%) y sólo Italia franqueaba en ese momento el 20% de su red ya electrificada.

Gráfico 1. Distribución de los sistemas eléctricos en los ferrocarriles europeos, 1930

Kilómetros en servicio



Fuente: Sintes y Vidal (1993).

¿Existe alguna lógica en la elección de los sistemas de corriente para la electrificación de los ferrocarriles en el mundo, y por consiguiente, en España? Algunos especialistas han defendido la relación existente entre el sistema de producción de energía, las características de la red de distribución y el sistema de corriente que terminaría por imponerse⁴¹. Siguiendo este razonamiento, en los países con una intensa producción hidroeléctrica se optó por corrientes de elevado voltaje, esto es, la corriente alterna monofásica, que suele operar entre 6-10kV (véanse los ejemplos del Anexo 1). Esto es bastante claro en países como Suiza, Estados Unidos, Suecia o algunos Estados alemanes, como Baviera o Sajonia. Italia, la zona norte se encontraría en esta situación también, pero como hemos advertido se consideró más apropiado el sistema trifásico, que también opera con elevadas tensiones. Por su parte, los países productores hulleros habían preferido en gran medida activar centrales térmicas para quemar sus carbones, aunque estos no fueran de gran calidad, para generar electricidad. En este caso, los voltajes eran más bajos y su aplicación a la tracción eléctrica se hizo con esa tensión reducida, como ocurrió en Inglaterra, especialmente, en el sur, donde para el sistema elegido de corriente continua en tercer carril, la tensión a 0'6kV era la idónea. Era una tensión tranviaria, pero ciertamente evitaba derivaciones por la proximidad de los carriles. El caso francés será, en este sentido, algo peculiar puesto que con una dotación intermedia de carbones e hidroelectricidad la aplicación de la corriente continua a 1'5kV tuvo una amplia difusión entre las grandes líneas como la París-Orléans, París-

⁴¹ Valentí (1918), pp. 74-79.

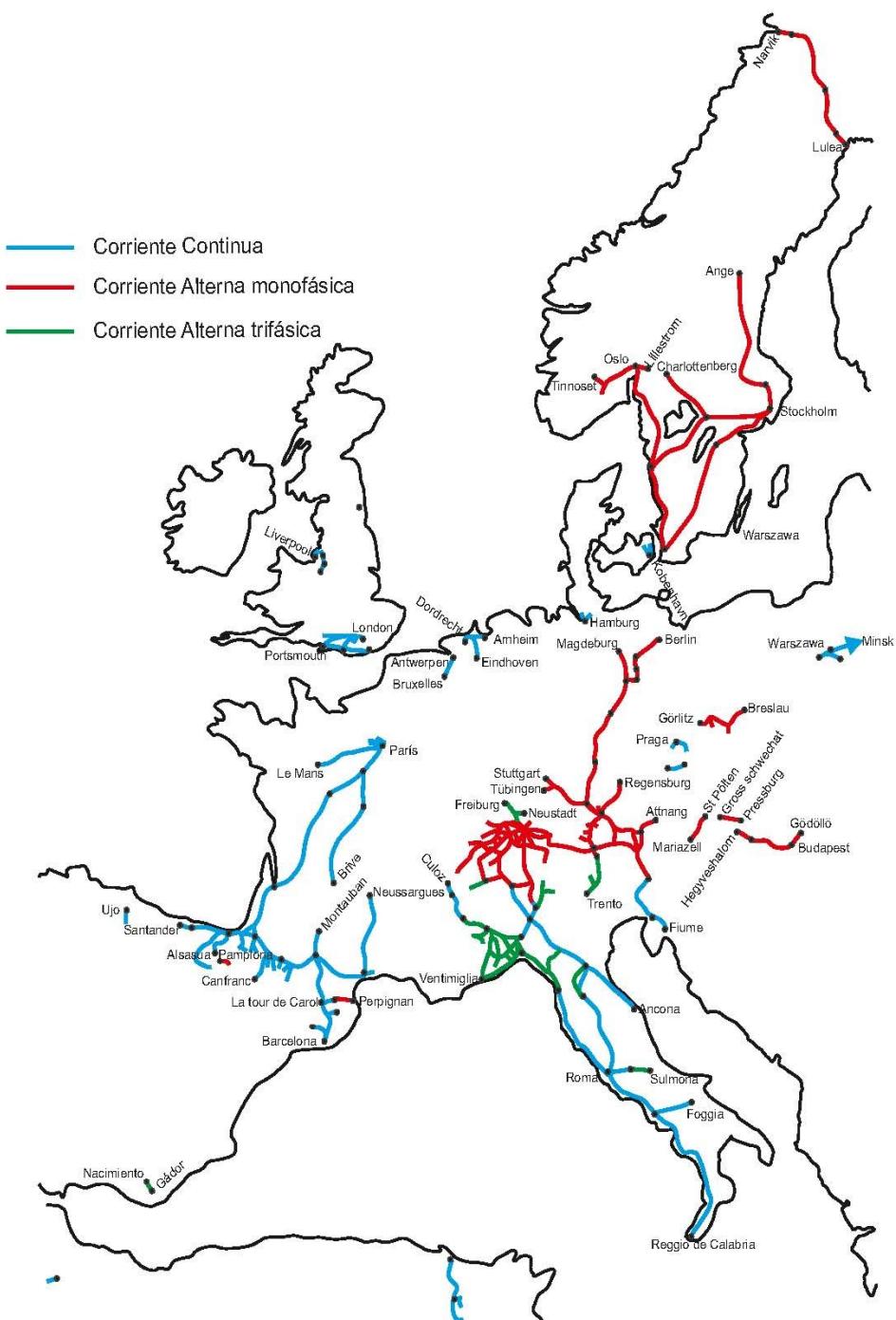
Lyon-Mediterráneo, la red de Oeste o la instalación de la red ferroviaria parisina a lo largo de los ejes, París-Austerlitz-Orsay-Juvisy e Invalides-Versalles (primeras líneas electrificadas francesas).

Sin embargo, el proceso de electrificación tiene para nosotros un interés especial, ya que inicialmente se realizó, a partir de 1913, la electrificación de sus líneas pirenaicas y subpirenaicas en corriente alterna monofásica a 12kV y 16 $\frac{2}{3}$ Hz, siguiendo el modelo suizo. Sin embargo, la estrategia nacional derivada de los resultados de Comité de Estudios para la Electrificación de la Red de Ferrocarriles de Interés General decidió en 1918 abordar un programa común de electrificación en diferentes líneas y la unificación de los sistemas, cuestión que fue sancionada en la ley de 19 de julio de 1922, utilizándose como argumentario cuatro ideas que ya hemos referido a lo largo del texto: la mayor fiabilidad de los motores de tracción en corriente continua, la seguridad en el uso del freno de recuperación, la eliminación de las interferencias en líneas telegráficas y telefónicas, y, finalmente, la decisión de establecer la frecuencia de la red general de alta tensión a 50Hz, lo que provocaba la pérdida de ventaja de la monofásica (recordemos que se había realizado a 16 $\frac{2}{3}$ Hz)⁴².

A nivel europeo, las primeras cuatro décadas del siglo XX aportaban ya un dibujo en red de las primeras electrificaciones ferroviarias (Mapa 1). Las fronteras desaparecen y una buena parte de la red tiene una clara relación con los trazados montañosos, además de con las grandes ciudades. Este efecto red es palpable en casi todos los países, si bien en la precariedad del caso español hay que señalar que hay claras desconexiones por los diferentes anchos de vía (las vías estrechas de Vascongados, Ferrocarriles Catalanes o del Bilbao-Santander) con las escasas realizaciones de vía ancha de NORTE. Veamos cómo se aplicaron los diferentes sistemas de corriente eléctrica a los ferrocarriles españoles.

Mapa 1. Sistemas y sus redes en la primera electrificación de los ferrocarriles europeos, 1940

⁴² Bouneau (2008), pp. 392-394.



Fuente: Machefert-Tassin, Nouvion y Woimant (1980), pp. 502-503.

La elección de sistema en los ferrocarriles españoles y sus consecuencias

La electrificación ferroviaria española en los primeros años de siglo XX fue exclusivamente tranviaria, fundamentada en el uso del sistema de corriente continua

debido a que no necesitaba tensiones elevadas y a que de esa forma se evitaban los peligros derivados de las altas tensiones en los núcleos urbanos. Tal y como consideraron Viani y Burgaleta, hasta 1911 no encontramos electrificaciones con propiedades verdaderamente ferroviarias en España⁴³. Estos primeros casos fueron los de las líneas de Pamplona a Sangüesa y Aoiz (1911), de Santa Fe a Gérgal (1912) y de San Sebastián a Hendaya (1912). En total, un centenar de kilómetros que presentaban la singularidad añadida de que cada uno aplicó un sistema de corriente distinto (Cuadro 1)⁴⁴.

Estas primeras realizaciones tenían la importancia de abrir el camino y establecer una dependencia de trayectoria que pueda ser seguida por los demás⁴⁵. En ese momento, influyeron seguramente menos los intereses empresariales que la búsqueda de una solución adaptada a los intereses técnico-económicos de cada caso, ni tampoco existía una planificación nacional que dictara un sistema a aplicar. De ahí, la construcción en monofásica de la línea ferroviaria de El Iraty estaba motivada por la disponibilidad e una corriente en alta tensión (trifásica de 20kV) de la central hidroeléctrica de Aoiz. En la parte ferroviaria de la línea, entre Huarte y Sangüesa y Aoiz se realizó la electrificación a monofásica de 6kV y 25Hz de frecuencia, mientras que en la parte tranviaria, de Pamplona a Huarte, se transformó a continua de 0'6kV.

Por su parte, el exigente tramo ferroviario de vía ancha de Santa Fe a Gérgal se electrificó en corriente alterna trifásica a 5'5kV y 25Hz a partir de la producción de la energía eléctrica de una central térmica construida en las proximidades de la línea. La elección de este sistema estaba motivada por adaptarse perfectamente a las dificultades de las grandes pendientes en rampa continua y por ofrecer el uso del frenado eléctrico de recuperación que permitía reintroducir energía eléctrica en el sistema a partir de la utilización de los motores como generadores en el descenso.

Por último, la línea de San Sebastián a Hendaya ofrecía un trazado de casi obligada electrificación en ese momento, ya que una parte muy importante de su trazado transcurría bajo tierra y también por zonas urbanas, por lo que la corriente continua a voltaje bajo (0'6kV) fue la solución adoptada, habitual en estos casos.

Estas realizaciones fueron sólo el comienzo (1911-1912) y en los años siguientes sería cuando se llevara a cabo el grueso de las electrificaciones españolas, tanto en vía ancha como en vía estrecha, de una primera etapa que se caracterizó por su escasez y por su uniformidad, ya que todas las realizaciones se hicieron en corriente continua a 1'5kV, con ligeros matices (Cuadro 1)⁴⁶.

Cuadro 1. Electrificaciones de ferrocarriles de vía ancha y de vía estrecha realizadas en España hasta 1933

⁴³ Viani y Burgaleta (1918).

⁴⁴ Un resumen de las características técnicas de las tres construcciones en Viani y Burgaleta (1918), pp. 19-24. En el caso de la línea de Almería, Viani y Burgaleta toman como referencia el interesante texto de Neu (1913).

⁴⁵ David y Bunn (1988). Ver análisis de Mokyr (1993), pp. 206-207.

⁴⁶ Además de las ligeras variantes en el voltaje de las electrificaciones en continua (entre 1'3 y 1'65kV), también se produjo la ampliación de la línea electrificada almeriense entre Santa y Gádor y entre Gérgal y Nacimiento, para alcanzar la treintena de kilómetros.

SIMPOSIO INTERNACIONAL

“Globalización, innovación y construcción de redes técnicas urbanas en América y Europa, 1890-1930. Brazilian Traction, Barcelona Traction y otros conglomerados financieros y técnicos”

Universidad de Barcelona, Aula Magna de la Facultad de Geografía e Historia, 23-26 de enero 2012

Compañía	Línea	Año	Km	Sistema	Tensión	Ancho
El Iratí	Huarte-Sangüesa-Aoiz	1911	53	AC-M	6kV-25Hz	1'00 m
SUR	Santa Fe-Gérgal	1912	22	AC-P	5'5kV-25Hz	1'67 m
San Sebastián a Frontera	San Sebastián-Hendaya	1912	22	DC	0'6kV	1'00 m
CFC	Sarriá-Tarrasa-Sabadell	1916	42	DC	1'2kV	1'44 m
SUR	Nacimiento-Gérgal	1918	6	AC-P	5'5kV-25Hz	1'67 m
SUR	Santa Fe-Gádor	1918	4	AC-P	5'5kV-25Hz	1'67 m
Guadarrama	Cercedilla-Navacerrada	1923	12	DC	1'35kV	1'00 m
NORTE	Busdongo-Ujo	1925	62	DC	3kV	1'67 m
Ferrocarril del Urola	Zumárraga-Zumaya	1926	35	DC	1'65kV	1'00 m
CGFC	Barcelona-San Baudilio	1926	10	DC	1'5kV	1'00 m
Estado	Estella-Vitoria	1927	70	DC	1'65kV	1'00 m
SMMP	Conquista-Puertollano	1927	56	DC	3kV	1'00 m
Santander-Bilbao	Bilbao-Algorta	1928	28	DC	1'65kV	1'00 m
NORTE	Barcelona-Manresa-San Juan	1928	234	DC	1'5kV	1'67 m
Vascongados	Bilbao-Durango-San Sebastián	1929	158	DC	1'65kV	1'00 m
NORTE	Alisasua - Irún	1929	212	DC	1'5kV	1'67 m
Estado	Ripoll-Puigcerdá	1929	49	DC	1'5kV	1'67 m
Ferrocarril de Sóller	Palma-Sóller	1929	28	DC	1'2kV	0'90 m
BP	Bilbao-Portugalete	1933	12	DC	1'5kV	1'67 m

Fuente: Elaboración propia. AC-P: Corriente Alterna Trifásica; AC-M: Corriente Alterna Monofásica; DC: Corriente Continua.

Con estos antecedentes, quedaba por establecer cual iba a ser el sistema que unificara la futura electrificación de los ferrocarriles españoles, lo que permitiría una compatibilidad completa, incluso aunque se tratara de líneas de compañías distintas. Esta cuestión en el caso de la vía estrecha era menos determinante ya que estas líneas normalmente no conectaban en red con otras líneas de vía estrecha, salvo en el norte peninsular, algunas zonas de Cataluña o el Levante español. Cuando la conexión era con una línea de vía ancha, el trasbordo era obligado, por lo que la compatibilidad de la electrificación era lo de menos. Además, cuando se afrontaba la electrificación de una línea de vía estrecha como un proceso de mejora, normalmente se procedía a cambiar el sistema de tracción en todo el recorrido, por lo que no había solución de continuidad. Sólo algún ejemplo como el del ferrocarril de Peñarroya, aportó a la vía estrecha dos redes diferentes cuando se llevó a cabo la construcción como línea electrificada del tramo de Conquista a Puertollano que completaba el corredor transversal iniciado en Fuente del Arco a Peñarroya y Villanueva de Córdoba. En este caso se hizo también en corriente continua a 3kV con alimentación proveniente de la central térmica de Puertollano⁴⁷, si bien se garantizaba la misma con una conexión a la red de MENGEMOR, compañía eléctrica

⁴⁷ Inicialmente, se concibió con alimentación trifásica, al igual que la línea de Almería, como era habitual en las líneas mineras y de carácter montañoso, Archivo General de la Administración (AGA), 26/21383, “Proyecto del ferrocarril con tracción eléctrica de vía estrecha entre Conquista y Puertollano” (1915).

de la zona que obtenía energía de varias centrales hidroeléctricas situadas en el curso medio del río Guadalimar, en la provincia de Jaén.

El primer gran proyecto a afrontar, tras las electrificaciones iniciales, era la electrificación de Pajares, punto clave por los problemas de tracción que se presentaban en la dura rampa asturleonesa sobre todo en lo relativo del tráfico ascendente de carbón de las cuencas asturianas a la meseta. La decisión de esta electrificación, manejada como un asunto de Estado, pasaría varias fases hasta su realización, ya que inicialmente se concibió al comenzar la Primera Guerra Mundial, debido a la importancia que adquiría la llegada de los carbones nacionales a los mercados españoles para suplir el sobreprecio y carencia de carbones foráneos a causa de la guerra. En 1918 se tomó la decisión de acelerar la operación y se concedió por parte del Estado una financiación sin intereses y a devolver en cómodos plazos para que la Compañía de los Caminos de Hierro del Norte de España (NORTE) llevara a cabo esta electrificación. Se abrió un concurso al que sólo, por el periodo bélico en el que nos encontrábamos, se presentaron compañías suizas que unánimemente propusieron la electrificación en corriente alterna monofásica con tensión inicial de 7'5kV (ampliable después a 15kV) a 16 $\frac{2}{3}$ Hz de frecuencia con energía que se distribuiría a partir de una central productora en las cercanías de la línea, siguiendo los parámetros de la electrificación de las líneas suizas.

Sin embargo, no parece que esta opción convenciera en exceso a las autoridades españolas y, tras un viaje rendido a Suiza, decidieron esperar, tal vez por el precio por encima del esperado o por los defensores de la corriente continua en nuestro país. Especialmente Sánchez Cuervo, pero otros muchos, en realidad, sólo encontramos de mono decidido una defensa del sistema monofásico en el opúsculo de Valentí, que lo consideraba como el más apropiado para las características de la red española, de baja densidad de tráfico y con un menor coste de establecimiento de las instalaciones, que se compensaba con el mayor coste de las locomotoras de tracción, ya que, precisamente por la baja densidad de tráfico, no sería necesaria la adquisición de mucho material de tracción⁴⁸.

Sin embargo, el final de la guerra trajo nuevos planteamientos y en el concurso se presentaron las grandes casas americanas, y sus filiales en Francia e Inglaterra, que plantearon la conveniencia de la electrificación en corriente continua. Las suizas Oerlikon y Brown Boveri mantuvieron sus propuestas sobre corriente monofásica, sin éxito, ya que el concurso fue adjudicado a General Electric, a través del consorcio franco americano de Thomson-Houston de París. Las razones que se dieron para desechar el sistema monofásico repetían algunas de las que ya hemos planteado anteriormente a nivel general:

- Los elevados gastos de conservación y explotación, **y el exceso de peso del material motor.**
- Diferencia de frecuencia entre el sistema propuesto por los suizos y el de transporte de la red de alta tensión española, de 15 $\frac{2}{3}$ a 50Hz, que eliminaba la ventaja de no tener que instalar una subestación de transformación.

⁴⁸ Valentí (1918), p. 92. Estos planteamientos, que suenan especialmente sensatos, no tuvieron mucho eco en la prensa técnica española.

- Dudas sobre la capacidad de aislamiento de la línea que evitara derivaciones y averías, especialmente en los abundantes túneles de la línea, debido a la alta tensión de la red y la abundancia de humedad.
- La necesidad de desviar las líneas telefónicas y telegráficas de las proximidades de la vía, por las interferencias de la corriente alterna, lo que hubiera obligado a una mayor inversión.
- Las mayores garantías en el frenado de recuperación de la corriente continua, especialmente por las duras rampas de la línea, ya que el sistema monofásico estaba todavía en fase de desarrollo.

Además, una vez decidida la adopción del sistema de corriente continua, se optó por una tensión mayor a la de otras líneas de vía estrecha o de los cercanos ferrocarriles franceses del MIDI, que trabajan a 1'5kV, porque con una sección de cobre en el cable de trabajo similar, se espaciaban convenientemente las subestaciones transformadoras. En el caso de Pajares, sólo fueron necesarias sendas subestaciones en La Cobertoria y Pajares⁴⁹.

Las siguientes electrificaciones en vía ancha en España (ver Cuadro 1) tuvieron como escenario Cataluña y el País Vasco, donde las electrificaciones se hicieron también en corriente continua, pero a 1'5kV, posiblemente debido a la menor exigencia de tracción de estas líneas, puesto aunque existían también duras rampas, en intensidad y longitud estaban muy por debajo de Pajares. También consideramos que hubo un segundo motivo para persistir en la tracción con corriente continua en la electrificación ferroviaria española, y es que el material automotor, especialmente preparado para viajeros, de las líneas monofásicas tenía el inconveniente, en esos momentos, de su tamaño, ya que las dimensiones de los motores monofásicos así lo obligaban. Por lo que, para las líneas de Barcelona-Manresa, Moncada-San Juan de las Abadesas, Alsasua-Irún o Bilbao-Portugalete, que tenían una importante presencia de material automotor, la elección de la corriente continua era más segura⁵⁰.

¿Existía también una preferencia de seguimiento hacia lo francés en la elección tecnológica que hacía? Es lógico pensar así era, ya que tanto la construcción de las redes de infraestructuras como de una buena parte de nuestro sistema financiero vino de la mano de los ingenieros e inversores franceses que aportaron un grado de influencia elevado a la construcción de nuestra sociedad. Tal vez pueda parecer algo exagerado, pero la influencia técnica y empresarial del mundo germánico en nuestro país, necesitado históricamente de la importación de tecnología y capital foráneo, no ha sido especialmente determinante.

La electrificación española, tras el paréntesis de la Guerra Civil, se retomaría bajo las mismas premisas con la extensión de la tensión a 1'5kV, más por una cuestión económica que técnica, adoptándose en la década de 1950 progresivamente la tensión a

⁴⁹ Según García Lomas, en Pajares se imponía el criterio americano de trabajar a 3kV sobre el europeo que prefería 1'5kV, García Lomas (1931), p. 196.

⁵⁰ También existe un interés internacional en la adopción de la tensión de 1'5kV en las líneas de catalanas y vascas ya que la red francesa al otro lado de los Pirineos está a ese voltaje. De hecho, el primer proyecto del tramo electrificado de Ripoll a Puigcerdá se hizo sobre 3kV, seguramente para mantener la lógica de Pajares, pero el interés de dar continuidad a una línea electrificada desde Barcelona a París, a través de Puigcerdá llevó al cambio de voltaje.

3kV, nuevamente con un importante auxilio técnico francés, de la mano de empresas y personajes muy relevantes al otro lado de los Pirineos como Sofrerail o el propio Louis Armand, que había sido presidente de la SCNF, pero esto es otra historia.

Conclusiones

El nuevo estado de cosas⁵¹ creado en el mundo a raíz de la expansión industrial de la electricidad supuso grandes cambios para la sociedad contemporánea. La posibilidad de mejorar y transformar la tracción de los ferrocarriles fue vista desde los primeros experimentos científicos como una posibilidad tecnológica de gran potencialidad.

Una vez que se consiguió dominar la electricidad mediante el control de los procesos de producción, transporte y tracción, la nueva tecnología estuvo preparada para implementarla en los ferrocarriles de todo el mundo en la primera década del siglo XX. Se desarrollaron tres sistemas (continuo, monofásico y alterno) que hicieron más complicada la elección y universalidad de las redes ferroviarias electrificadas.

Los motivos de elección estuvieron en muchas ocasiones sometidos a criterios de dependencia tecnológica, habituales en el mundo de la empresa moderna que busca en la ampliación del mercado economías de escala para desarrollar su tecnología.

España se encontró en una situación objetiva adecuada para el desarrollo de sus líneas electrificadas, debido a la carencia de carbón y a las grandes dificultades orográficas de sus líneas, pero también tuvo carencias en la financiación y en la decisión política, que por supuesto, se vieron influidas negativamente por la escasez del tráfico ferroviario español, acorde con el parco desarrollo económico de nuestro país.

Aun así, nuestros ferrocarriles también se encontraron discutiendo al acabar la Primera Guerra Mundial, como ocurría en otros países, sobre qué sistema de corriente aplicar a sus líneas de mayor interés en la electrificación. Los primeros ensayos fueron dispersos y estuvieron caracterizados por la diversidad de opciones. Sin embargo, a partir de la electrificación de Pajares (1924) se consolidó la elección del sistema de corriente continua, presente en países vecinos, como Francia, pero también con la influente tecnología norteamericana, que ya se generalizaría tanto en los ferrocarriles de vía ancha como de vía estrecha, a tensiones diferentes de 1'5 y 3kV.

Anexo 1. Primeros ferrocarriles eléctricos en el mundo (1890-1913): cronología, extensión y sistemas

	Corriente Continua				Corriente Alterna Trifásica				Corriente Alterna Monofásica			
	Línea	País	Km	Tensión	Línea	País	Km	Tensión	Línea	País	Km	Tensión
1890	City and South London Railway	GBR	23,7	500V								
1895	Baltimore	EEUU	13,5	500V								
1899					Berthoud-Thoune	SUI	42,5	750V 40Hz				
1900	París-Juvisy	FRA	75,0	600V								
1901	París-Versalles	FRA	40,0	550V								
	Milán-Varese-Porto-Ceresio	ITA	135,0	650V								

⁵¹ Westinghouse (1911), p. 73.

SIMPOSIO INTERNACIONAL

“Globalización, innovación y construcción de redes técnicas urbanas en América y Europa, 1890-1930. Brazilian Traction, Barcelona Traction y otros conglomerados financieros y técnicos”

Universidad de Barcelona, Aula Magna de la Facultad de Geografía e Historia, 23-26 de enero 2012

	Corriente Continua				Corriente Alterna Trifásica				Corriente Alterna Monofásica			
	Línea	País	Km	Tensión	Línea	País	Km	Tensión	Línea	País	Km	Tensión
	Montreux-Zweisimmen	SUI	62,1	750V								
1902					Chiavenna-Colico-Lecco	ITA	160,0	3.000V 16⅔Hz				
1903	St. Georges de Commiers - La Mure	FRA	33,0	1.200V								
	Fribourg - Morat - Anet	SUI	32,3	800V								
1904	North Eastern Railway	GBR	125,5	600V					Indianapolis and Cincinnati Traction Co	EEUU	350,0	3.300V 25Hz
	Lancashire and Yorkshiere Railway	GBR	112,5	600V								
1905	Metropolitan and Distric Railway	GBR	129,2	600V					San Francisco-Vallejo-Napa	EEUU	54,0	3.300V
	Metropolitan Railway	GBR	96,6	600V								
1906	Colonia-Bonn	ALE	44,2	550V	Brig-Iselle	SUI	24,0	3.000V 16⅔Hz	Long Island	EEUU	22,0	650V
	West Jersey and Seashore Railroad	EEUU	261,0	650V					Spokane and Inland Railway	EEUU	255,0	6.000V 25Hz
	New York Central and Hudson River	EEUU	162,5	650V					Erie Railroad	EEUU	112,0	11.000V 25Hz
1907	Bellizone - Mesocco	ITA	31,5	1.500V					Pittsburg-Butler	EEUU	126,0	6.600V 25Hz
									L'Erie	EEUU	61,2	11.000V 25Hz
									New York-New Haven Hartford	EEUU	883,0	11.000V 25Hz
									Bergame - San Giovanni Bianco	ITA	30,0	6.000V 25Hz
1908	Pittsburgh and New Castle Railway	EEUU	75,0	1.200V					Blankenes-Hamburg-Ohlsdorf	ALE	60,3	6.300V 25Hz
	St. Moritz-Tirano	SUI	60,6	1.000V					Grand Trunk	CAN	19,3	3.300V 25Hz
									Chicago - Lake Shore	EEUU	228,0	6.600V 25Hz
									Rotterdam - Haag - Scheveningen	HOL	70,7	10.000V 25Hz
1909					Great Northern	?	13,0	6.000V 25Hz	Great Northern (Amerique)	EEUU	22,0	6.000V 25Hz
									London Brighton and South Coast Railway	GBR	112,0	6.700V 25Hz
									Napoles-Santa Maria Piedmonte	ITA	82,0	11.000V 25Hz
1910	Milwaukee Light Heat and Traction C	EEUU	68,0	1.200V	Campasso Pontedéximo Busallo	ITA	60,0	3.000V 15Hz	Wildegg-Emmesbrücke	ALE	65,9	5.000V 25Hz
	Shore Line Electr C	EEUU	52,0	1.200V								
	Chemin de fer de Pensylvanie	EEUU	120,7	650V								
	Wash Balt & Annapolis Rd C	EEUU	89,0	1.200V								

SIMPOSIO INTERNACIONAL

“Globalización, innovación y construcción de redes técnicas urbanas en América y Europa, 1890-1930. Brazilian Traction, Barcelona Traction y otros conglomerados financieros y técnicos”

Universidad de Barcelona, Aula Magna de la Facultad de Geografía e Historia, 23-26 de enero 2012

	Corriente Continua				Corriente Alterna Trifásica				Corriente Alterna Monofásica			
	Línea	País	Km	Tensión	Línea	País	Km	Tensión	Línea	País	Km	Tensión
1911	Ft. Dodge, Des Moines & Southern Railway	EEUU	145,0	1.200V					St. Poelten - Mariazell - Gusswerk	AUS	106,0	6.500V 25Hz
	Southern Pacific Railway	EEUU	96,0	1.200V					Waitzen - Budapest - Godollo	AUS	59,4	10.000V 15Hz
									Tunnel de Honsac	EEUU	34,4	11.000V 25Hz
1912					Santa Fe - Gérgal Busolene - Mudane	ESP	24,0 100,0	5.500V 25Hz 3.300V 16⅔Hz	Innsbruck - Reutte Pamplona - Sangüesa	AUS	120,0 70,0	10.000V 15Hz 6.000V 25Hz
1913									Vienne - Presburg Bale - Schoptheim - Saeckingen - Zeli Spiez - Brigue St. Moritz - Schuls - Samadem - Pontresina	SUI	86,8 84,0 74,0	10.000V 15Hz 10.000V 15Hz 15.000V 15Hz 10.000V 16⅔Hz

Fuente: Elaboración propia a partir de Valentí (1918), p. 78.

Bibliografía

ARMSTRONG, A. H. (1913): “The Engineering Problem of Electrification”, *Electric Railway Journal*, vol. XLII, nº 25, pp. 1284-1292.

BESEN, Stanley M. (1992): “AM versus FM: The Battle of the Bands”, en *Industrial and Corporate Change*, Volume 1, Number 2, pp. 375-396.

BOUNEAU, Christophe (2008): *Entre David et Goliath. La dynamique des réseaux régionaux. Réseaux ferroviaires, réseaux électriques et regionalization économique en France du milieu du XIX^e siècle au milieu du XX^e siècle*. Maison des Sciences de l’Homme d’Aquitaine, Bordeaux.

DAVID, Paul A. (1985): “Clio and the Economics of QWERTY”, *AEA Papers and Proceedings*, vol. 75, nº 2, pp. 332-337.

DAVID, Paul A. (1990): “The Dynamo and the Computer: An Historical Perspective on the Modern Productivity Paradox”, *AEA Papers and Proceedings*, vol. 80, nº 2, pp. 355-361.

DAVID, Paul A. y BUNN, Julie A. (1987a): “The ‘Battle of the Systems’ and the Evolutionary Dynamics of Network Technology Rivalries”, *High Technology Impact Program Working Paper no. 15*, Center for Economic Policy Research, Stanford University, January.

DAVID, Paul A. y BUNN, Julie A. (1987b): “The economics of gateway technologies and network evolution: Lessons from electricity supply history”, *Information Economics and Policy*, Volume 3, Issue 2, pp. 165-202.

DAVID, Paul A. (1991): “The Hero and the Herd in Technological History: Reflections on Thomas Edison and the Battle of the Systems”, en P. Higonnet, D. S. Landes y H.

Rosovsky, Ed., *Favorites of Fortune. Technology, Growth, and Economic Development since the Industrial Revolution*, Harvard University Presss, Cambridge, London, pp. 72-119.

DERRY, T. K. y WILLIAMS, Trevor I. (1987): *Historia de la Tecnología. Desde 1750 hasta 1900 (II)*. Siglo XXI de España Editores, Madrid.

GILLE, Bertrand (1978): *Histoire des Techniques: Techniques et Civilizations, Techniques et Sciences*. Editions Gallimard, París.

GONZÁLEZ BUENO, Pedro (1945): “Plan de electrificación de 4.211 kilómetros de vía simple de ancho normal a realizar en doce anualidades”, *Revista de Obras Públicas*, pp. 505-516 y 561-565.

GONZÁLEZ DE LAS CUEVAS, José y SASTRE RODRÍGUEZ, Francisco (1887): *Diccionario general de ferrocarriles, legislativo, administrativo, técnico y comercial*. Establecimiento tipográfico de Manuel Minuesa, Madrid.

HAUSMAN, William J.; Neufeld, John L.; y Wilkins, Mira (2008): “The Invention and Spread of Electric Utilities, with a Measure of the Extent of Foreign Ownership”, en W. Hausman, P. Hertner, y M. Wilkins, *Global Electrification. Multinational Enterprise and International Finance in the History of Light and Power, 1878-2007*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 3-34.

JIMÉNEZ ONTIVEROS, Francisco (1941): “Algunas notas sobre el problema económico de la electrificación de ferrocarriles”, *Revista de Obras Públicas*, pp. 272-286.

LÓPEZ, S. y VALDALISO, J. M. (1997): “Hacia una nueva Historia Económica Evolutiva”, en S. López y J. M. Valdaliso, *¿Qué inventen ellos? Tecnología, empresa y cambio económico en la España contemporánea*, Alianza Universidad, Madrid, pp. 19-49.

MACHEFERT-TASSIN, Yves; NOUVION, Fernand; y WOIMANT, Jean (1980): *Histoire de la traction électrique. Tome 1. Des origines à 1940. La vie du rail*, París.

MOKYR, Joel (1993): *La palanca de la riqueza. Creatividad tecnológica y progreso económico*. Alianza Editorial, Madrid.

NEU, L. (1913): “Le chemin de fer électrique a récupération de Gergal a Santa Fé (Espagne)”, *La Technique Moderne*, tome VIII, nº 5, pp. 170-175.

PROUT, Henry G. (1921): *A life of George Westinghouse*. The American Society of Mechanical Engineers, New York.

RAHOLA, Silvio (1915): *Tratado de ferrocarriles. Tomo tercero: tracción por vapor*. Establecimiento tipográfico Sucesores de Rivadeneyra, Madrid.

ROSENBERG, Nathan (1994): “Incertidumbre y cambio tecnológico”, *Revista de Historia Industrial*, nº 6, pp. 11-30.

SÁNCHEZ CUERVO, Luis (1919): “Electrificación de los ferrocarriles españoles”, *Revista de Obras Públicas*, pp. 437-440, 449-453, 464-469 y 475-480.

SIMPOSIO INTERNACIONAL

“Globalización, innovación y construcción de redes técnicas urbanas en América y Europa, 1890-1930. Brazilian Traction, Barcelona Traction y otros conglomerados financieros y técnicos”

Universidad de Barcelona, Aula Magna de la Facultad de Geografía e Historia, 23-26 de enero 2012

SANTOS Y GANGES, Luis (2007): *Urbanismo y ferrocarril. La construcción del espacio ferroviario en las ciudades medias españolas*. Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid.

VALENTÍ Y DORDÁ, José Luis (1918): *Memoria acerca de la conveniencia y posibilidad de electrificar los ferrocarriles españoles*. Ministerio de Fomento, Imprenta de Artes Gráficas, Madrid.

VIANI, Mario y BURGALETA, Vicente (1919): *Conveniencia y posibilidad de electrificar los ferrocarriles españoles*. Ministerio de Fomento, Madrid.

VIANI, Mario (1945): “Electrificación ferroviaria. Punto de vista militar”, *Ejército*, pp. 9-18.

WESTINGHOUSE, George (1911): “Tracción eléctrica”, *Revista de Obras Públicas*, nº 1.847, pp. 73-92.