

Electrificación del sistema ferroviario internacional Posadas-Encarnación: Estudio del estado del arte

Boher José ^a, Skölfman Guillermo ^a, Yuchechen Darío Iván ^a, Oliveira, O. Mario ^a

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.
e-mails: joseboher77@gmail.com, guillermoskolfman@gmail.com, darioyuchechen@gmail.com,
oliveira@fio.unam.edu.ar

Resumen

El trabajo presentado abarca el estudio del estado del arte de los sistemas de tracción eléctrica utilizados en ferrocarriles. Esta desarrollado dentro del marco del proyecto de fin de grado de los autores para la carrera de Ingeniería Electromecánica, que se encuentra en proceso de realización y tiene como objetivo general el estudio técnico, económico, legal y ambiental de la electrificación del servicio ferroviario internacional Posadas - Encarnación. La importancia de esta revisión bibliográfica inicial radica en la necesidad del ingeniero de interiorizarse sobre los aspectos relativos al proyecto y que son fundamentales para reconocer la tecnología y recursos necesarios para su ejecución.

Palabras Clave – Catenaria, Electrificación, Encarnación, Ferrocarril, Internacional, Posadas, Riel, Tracción, Tren.

1. Introducción

La historia de los ferrocarriles eléctricos comienza con los experimentos de Robert Davidson en el año 1838. Los primeros proyectos de electrificación ferroviaria comienzan en 1895 en Estados Unidos y Europa. A partir de la Segunda Guerra Mundial las locomotoras diésel comienzan a desplazar a las eléctricas hasta que en la década de 1980 los servicios de alta velocidad reviven el uso de la electricidad en la tracción. En la actualidad los sistemas de alimentación de locomotoras eléctricas utilizan corriente continua o corriente alterna donde los principales medios de alimentación son por catenaria o tercer riel. Además, existen alternativas más novedosas y complejas como los sistemas sin contacto, como el modelo Primove y el tren de levitación magnética. Los sistemas con catenaria y tercer riel utilizan para sus locomotoras principalmente motores asíncronos trifásicos para servicios de alta velocidad y motores de corriente continua para servicios de corta distancia. La decisión de electrificar una línea desde el punto de vista ambiental se centra en la contribución al agotamiento de combustibles fósiles y la emisión de gases de efecto invernadero que es común a todos los sistemas de tracción, pudiendo disminuirse en la tracción eléctrica si la energía proviniera de fuentes renovables y se aprovechara la regeneración en el frenado. En este sentido, el objetivo de este trabajo es adquirir los conocimientos necesarios para el establecimiento de la viabilidad técnica, económica, legal y ambiental de la implementación de un sistema de tracción eléctrica al servicio ferroviario internacional Posadas – Encarnación.

2. Historia de la electrificación del ferrocarril

2.1. Resumen histórico

Las primeras pruebas con trenes eléctricos las inició Robert Davidson en 1838, cuando construyó un carruaje equipado por baterías capaz de alcanzar 6,4 km/h. Pese a realizar demostraciones en numerosas exposiciones, su invento no logró aplicarse de forma práctica para pasajeros ni bienes. El primer tren fabricado por Siemens y Halske se puede considerar como el primer logro práctico en la tracción eléctrica el cual se puso en circulación el 31 de mayo de 1879 en la exposición de Berlín, transportando más de 86000 visitantes en los cuatro meses que permaneció en la exposición.

Según lo expuesto en [5], entre los años 1888 y 1890 la técnica de la tracción eléctrica sale de su infancia y se desarrollan las redes de tranvías eléctricos. En 1895 se inaugura el primer servicio mixto (carga y pasajeros) sobre una gran línea ferroviaria en Baltimore, Estados Unidos. Recién en ese mismo año se comienza a manifestar la actividad constructora en Europa, impulsada principalmente por la disponibilidad de energía hidroeléctrica, la dificultad de mover los suministros de carbón en zonas montañosas y la mayor tracción que presentaban las locomotoras eléctricas.

En los inicios del siglo XX existían dos tendencias en la técnica de las electrificaciones. Una, mediante la simplificación al máximo de las instalaciones de alimentación de energía de las locomotoras y otra, escoger el mejor motor, subordinando a segundo término el sistema de alimentación de la locomotora. Esta segunda alternativa impulsó la utilización de la Corriente Continua (CC) ya que, en ese entonces, los motores de Corriente Alterna (CA) no eran muy bien comprendidos.

Los distintos ensayos realizados por los fabricantes durante esta última época, utilizando distintas tecnologías, demostraron la viabilidad del concepto mixto: alta tensión en frecuencia industrial en la catenaria y baja tensión en multiplicación de fases a la misma frecuencia o en continua en tensión variable en los motores de tracción.

En el período entre guerras se construyeron numerosos ferrocarriles de CC, la principal discrepancia era sobre la tensión a utilizar. En ferrocarriles metropolitanos y en las líneas de cercanía de Inglaterra, Francia y Bélgica se utilizó 1000 o 1500 voltios. Esta tensión también fue adoptada por Japón para las cercanías de Tokio y Osaka. Sin embargo, durante este período predominó la tensión de 3000 voltios, con la cual un gran número de países iniciaron sus proyectos de electrificación: Brasil, Chile, México, África del Sur, Argelia, Marruecos, Polonia y Unión Soviética.

Tras la Segunda Guerra Mundial, la tracción a vapor se encareció con respecto a los demás sistemas. Esto causó un interés mayor por los sistemas eléctricos de tracción, pero también por las mejoradas locomotoras diésel que comenzaron a ser más baratas y potentes. Esto causó que muchas compañías ferroviarias comenzaran a convertir sus locomotoras a diésel.

En los Estados Unidos, el uso de locomotoras eléctricas declinó a favor de la dieselización. Estas compartían las ventajas de las locomotoras eléctricas sobre el vapor, pero con el agregado de no requerir instalaciones además de las vías. Por otro lado, la multiplicación de las centrales de producción de energía y de las redes de distribución, con utilización de frecuencias de 50 a 60 Hz,

permitieron, cada vez en mejores condiciones, tomar la corriente de suministro de la propia red general de electricidad, mejorando las condiciones para la electrificación de vías.

Posteriores avances se lograron gracias a la introducción de los sistemas de control electrónicos, los cuales permiten usar motores cada vez más pequeños y potentes que pueden caber enteramente en los bogies (normalizados a partir de la década de 1990 en motores asincrónicos trifásicos, alimentados a través de inversores GTO¹).

En la década de 1980, el desarrollo de servicios de muy alta velocidad revivió la electrificación. El Shinkansen japonés y el TGV francés fueron los primeros sistemas a los que se les dedicó líneas de alta velocidad construidas desde cero. En ambos sistemas ferroviarios se encontró cobijo en la viabilidad de la alta tensión alterna para transportar las grandes potencias requeridas.

La prodigiosa evolución técnica de los distintos sistemas hace que la elección de un sistema de tracción obedezca ya más a razones políticas que técnicas.

2.2. Evolución del marco regulatorio

La primera ley nacional sobre ferrocarriles en Argentina data del año 1855. Mediante la misma se aprobaba un contrato para realizar los estudios técnicos y construcción de un ferrocarril que uniera un puerto del río Paraná con la ciudad de Córdoba. La concesión fue autorizada ese mismo año por la ley N° 22, [6], sin participación de la provincia de Buenos Aires.

Hasta 1880 el régimen tarifario fue prácticamente libre. La Ley N° 531, [7], sobre Ferrocarriles Nacionales de 1872 apenas hacía referencias aisladas, promoviendo que el costo de explotación y el precio de venta del transporte fuera función privativa de las empresas.

En el año 1891 se sancionó la Ley N° 2873, [8], denominada Ley General de Ferrocarriles Nacionales creándose con ella la Dirección de Ferrocarriles. Esta ley derogó la anterior Ley N° 531, [7], ampliando las disposiciones que poseía y legislando en todo lo referente a conservación, vigilancia y mantenimiento de las vías y del material rodante. Sin embargo, su verdadera importancia radicaba en lo referente a la jurisdicción de los ferrocarriles, la condición en que debían acordarse las concesiones, los empalmes y la autorización de aumentos tarifarios. La ley diferenciaba entre ferrocarriles nacionales y provinciales, estableciendo que los primeros tenían que vincular la Capital Federal con una o más provincias.

En 1907, la Ley N° 5315, [9], también llamada Ley Mitre, modificó el régimen legal de las empresas. Esta ley ampliaba los plazos de exenciones impositivas que gozaban las empresas y uniformizaba los plazos de concesión a cuarenta años.

Durante el primer gobierno del presidente Juan Domingo Perón se tomó la decisión de nacionalizar los ferrocarriles y por ende las concesiones de la infraestructura portuaria. Las negociaciones comenzaron en 1946 y se formalizaron las expropiaciones con un decreto del poder ejecutivo nacional del año 1948.

Desde su nacionalización, el sistema ha estado bajo jurisdicción de distintos regímenes. Primero la Empresa Nacional de Transporte (ENT), dentro del seno de la Secretaria de Transporte, tuvo a su cargo la administración y explotación del sistema. Para los años 1956 y 1958 fueron creados la

¹ Gate Turn-Off Thyristor

Superintendencia de Ferrocarriles y la Empresa Ferrocarriles del Estado Argentino (EFEA). Existían en ese entonces seis administradores y EFEA hacía las veces de Organismo Central.

Con la iniciativa de la Ley N° 23696, [10], de reforma del estado, en 1991, se llevó a cabo una desarticulación de Ferrocarriles Argentinos mediante una completa concesión de la red ferroviaria. Los servicios metropolitanos de pasajeros fueron entregados a una nueva empresa pública FEMESA, para ser finalmente concesionados a consorcios privados. La responsabilidad sobre los servicios interurbanos de pasajeros fue transferida a los gobiernos provinciales, la mayoría de los cuales no continuo con los servicios. El concesionario solo gozaba la explotación comercial, la operación de trenes, la atención de estaciones, el mantenimiento del material rodante y la facultad de regular y controlar la actividad de los mismos.

A fin de ejecutar y fiscalizar las normas y decisiones políticas tomadas por la Administración Central, a través de la Secretaria de Transporte, se crearon tres instancias administrativas eminentemente técnicas: Unidad de Coordinación del Programa de Reestructuración Ferroviaria (UCPRF), Comisión Nacional de Transporte Ferroviario (CNTF) y Comisión Nacional del Transporte Automotor (CoNTA). Todas creadas a partir de decretos en el año 1993.

Poco tiempo funcionaron hasta que, en el año 1996, se dispuso a fusionar estos tres organismos en la actual Comisión Nación de Regulación del Transporte (CNRT) que concentra sus recursos en el control y fiscalización de las actividades desarrolladas por sus operadores, así como la protección de los derechos de los usuarios.

Años después, bajo el marco del llamado Reordenamiento Ferroviario, se promulga la Ley N° 26352/08, [11], a partir de la cual se crean dos nuevas Sociedades del Estado en la órbita del Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios. El objeto de esta ley es el reordenamiento de la actividad ferroviaria, ubicando como pieza clave de toda la acción, de los nuevos criterios de gestión y de rentabilidad, la consideración del usuario. Las dos nuevas sociedades creadas son: Administración de Infraestructuras Ferroviarias Sociedad del Estado (denominada en la actualidad Trenes Argentinos Infraestructura) y Operadora Ferroviaria Sociedad del Estado (SOFSE). Siendo esta última el ente que llevó adelante la licitación del actual servicio ferroviario internación Posadas-Encarnación.

3. Tecnologías empleadas en la tracción eléctrica de ferrocarriles

3.1. Tecnologías Actuales

Los sistemas de suministro de la energía al tren que se utilizan en la actualidad se clasifican en dos grandes grupos: los que utilizan CA y los que utilizan CC. Estos sistemas pueden alimentar al tren a través de un conductor aéreo denominado catenaria o un conductor a nivel del suelo denominado tercer riel. La catenaria representa el polo positivo por el cual un elemento de contacto denominado pantógrafo toma la corriente necesaria para energizar el tren, cerrando el circuito a través de uno de los rieles. El tercer riel posee la misma geometría que los rieles de la vía ferroviaria y es utilizado como el polo positivo por el cual una escobilla colecta la corriente que energiza el tren.

Según lo que indica [1], los sistemas de alimentación en CC son denominados así dado que la red esta alimentada por subestaciones rectificadoras, compuestas por transformadores y puentes de

diodo de seis o doce pulsos. La red de tracción que alimenta a los trenes es dividida en secciones eléctricas separadas por aislamientos de superposición. Sin embargo, se plantean mecanismos para poder realizar conexiones entre secciones que dotan a estos sistemas de confiabilidad y disponibilidad del suministro. La tensión de alimentación puede variar entre 600V a 3kV y el polo negativo generalmente está conectado a los rieles los cuales a su vez se conectan tierra. En Fig. 1 se puede observar un diseño básico de cómo se puede obtener una catenaria en CC a partir de una red trifásica de 50 Hz.

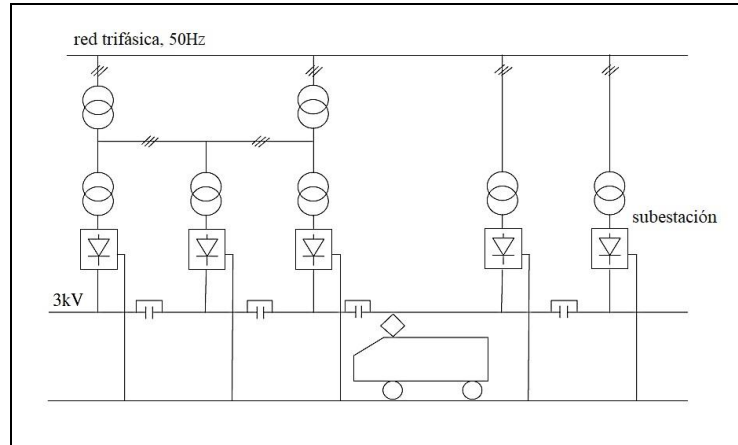


Fig. 1. Sistema de suministro de energía con CC.
Fuente: Adaptado de Abad 2017

Los sistemas de alimentación en (CA) a 50Hz no utilizan equipos de electrónica de potencia. La catenaria de CA se obtiene tomando dos fases de la red pública de media tensión a 50Hz y reduciendo la amplitud de la tensión con la ayuda de transformadores. Por lo tanto, las secciones de alimentación separadas se conectan a las fases posteriores de la red de media tensión trifásica, a fin de mitigar el desequilibrio causado por el consumo de energía del tren. Debido a esto se requieren grandes aislantes entre catenarias de diferentes fases. Esto significa que existen ciertas secciones de la catenaria donde el tren no se encuentra conectado a ningún suministro y continúa funcionando debido a su inercia, perdiendo una pequeña cantidad de velocidad. Esta configuración presenta una capacidad limitada de recuperación de energía en el frenado, debido a la separación en segmentos que tiene la catenaria. La Fig. 2 muestra un ejemplo de la configuración de un sistema de alimentación con CA.

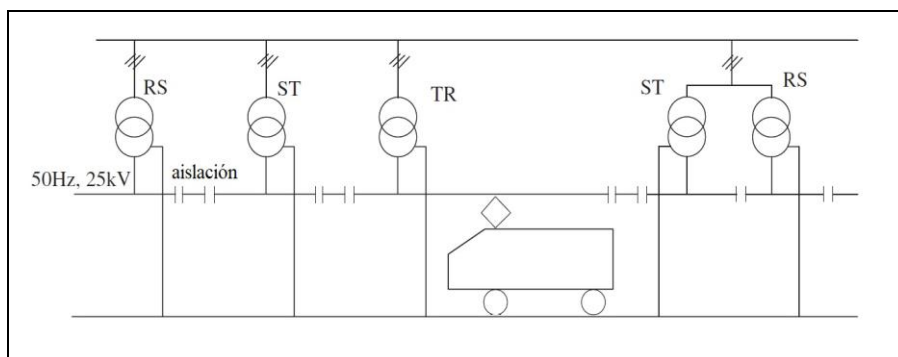


Fig. 2. Sistema de suministro de energía con CA.
Fuente: Adaptado de Abad 2017.

Los sistemas de alimentación con frecuencia de 16,7 Hz presentan la ventaja de no segregarse en diferentes secciones aisladas, proporcionando un alto nivel de aprovechamiento del freno regenerativo.

La alimentación con sistemas en tercer riel se realiza a través de un riel energizado que se mantiene al lado de los rieles ferroviarios a lo largo de todo el trayecto. El tercer riel está blindado de un lado y se energiza de forma segmentada por razones de seguridad. Una escobilla de pie plano colecta la corriente desde la parte superior del tercer riel, el cual se encuentra soportada por aisladores cada 2,5 o 5 metros. En general, está limitado a una velocidad máxima de 70 km/h y es utilizado principalmente en aplicaciones de metro. Estos sistemas poseen problemas de confiabilidad debido a las posibilidades de acumulación de agua, nieve y hielo, además de encontrarse fuertemente patentadas por las empresas Alstom, Ansaldo y Bombardier.

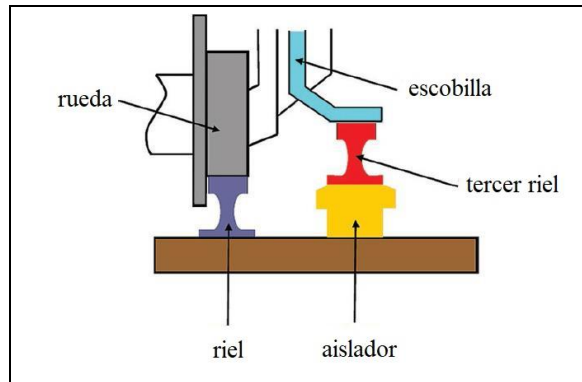


Fig. 3. Conductor en tercer riel.
Fuente: Adaptado de Abad 2017.

Estas empresas han brindado soluciones de transporte en lugares donde la alimentación con catenaria produciría una contaminación visual inaceptable. El sistema APS (Alimentation Par le Sol) para la ciudad francesa de Burdeos es un ejemplo donde el tercer riel se ubica entre las vías y es energizado en secciones de 11 metros sólo cuando el tren se encuentra sobre ellos. El sistema TramWave de Ansaldo lleva este concepto al extremo, utilizando secciones de tan solo 50 cm. Cuando los rieles no se encuentran energizados, son conectados a tierra para evitar riesgos eléctricos para los peatones.

Un sistema de alimentación muy particular es el que utiliza el denominado motor lineal (LIM) que ha ganado popularidad para las aplicaciones de tránsito masivo como en el caso de los Metros de Luz Automatizados. En la filosofía LIM, el estator del motor del inductor de propulsión se fija en el bogie del vehículo y el rotor se coloca entre los rieles del ferrocarril. El estator es alimentado por un inversor de potencia que toma la energía de un tercer riel a lo largo de la ruta. La principal característica importante de los sistemas de propulsión LIM es que no se aplica esfuerzo de tracción en la rueda. El vehículo es arrastrado por la fuerza magnética generada entre el circuito primario de alimentación incorporado y el rotor lineal conectado a tierra. Debido a esta característica, no se usan cajas de engranajes, eje de transmisión ni cojinetes, como en los bogies clásicos.

Existen en la actualidad otras tecnologías que realizan la alimentación del tren sin contacto eléctrico, apoyándose en la energía que puede ser transmitida a través de campos magnéticos. El sistema Primove desarrollado por Bombardier en 2009 transfiere la energía de entre los rieles del

ferrocarril al vehículo mediante un campo magnético inductivo. Un bucle conductor está enterrado entre los rieles de la pista que se activa justo cuando un vehículo pasa por encima, creando un campo magnético debajo de ese vehículo. A medida que el vehículo atraviesa el campo magnético, un receptor incorporado convierte ese campo magnético en energía eléctrica para alimentar los sistemas de propulsión y servicios auxiliares a bordo. No hay partes vivas expuestas que puedan causar ningún peligro eléctrico a los peatones y el aspecto de la pista es el mismo que el de los tranvías convencionales.

Los vehículos ferroviarios de levitación magnética son otro tipo de vehículo impulsado por el nivel del suelo. La principal característica de estos vehículos es que pueden moverse flotando a lo largo de la línea dedicada gracias a las fuerzas magnéticas entre el vehículo y la pista. El vehículo contiene electroimanes de levitación a bordo y el estator se divide a lo largo de la pista. La potencia es suministrada por el largo devanado estático en el lado del camino. Debido a que el devanado del estator y el equipo de acondicionamiento de potencia se encuentran en el camino, el vehículo es más ligero que un tren convencional. Esto permite el funcionamiento a alta velocidad (se han demostrado hasta 500 km / h).

3.2. *Motores eléctricos empleados en locomotoras*

Dentro de la clasificación de motores eléctricos de CA, el motor síncrono trifásico es un motor el cual en el ámbito ferroviario tiene utilidades muy específicas, normalmente cuando se requiera de una velocidad fija de funcionamiento. Tuvo una gran importancia en los inicios de los trenes de alta velocidad, utilizado por el primer tren de alta velocidad en España, pensado para cubrir la ruta Madrid - Sevilla con motivo de la exposición internacional de 1992, aunque actualmente se encuentra en desuso.

El motor asíncrono trifásico, predominante hoy en día en los trazados de alta velocidad a nivel internacional, debido a las ventajas de potencia, mantenimiento y ligereza que presenta. Este motor es el predominante en todo tipo de tramos actuales alimentados a 25kV en CA y 50 Hz, como en tramos alimentados en CC, reemplazando cada vez más al motor de CC. Es motor de CA por excelencia, montado en multitud de modelos tanto en alta velocidad, como en el transporte a larga distancia o de cercanías.

Refiriéndonos ahora a los motores de CC, siguen siendo empleados en algunos modelos de cercanías y metro, pero siendo cada vez más reemplazados por el motor asíncrono trifásico. Este motor fue de los pioneros en el transporte por ferrocarril, puesto que antes de la existencia de la electrónica de potencia y dado que en los sistemas ferroviarios predominaba la alimentación en CC, el motor tenía que ser acorde al sistema de alimentación de la red ferroviaria por la que el tren iba a transcurrir.

Debido al avance de la electrónica de potencia, hoy en día está cayendo en desuso, dado que, una vía con CC no es problema convertir a CA y poder aplicar así el motor asíncrono trifásico dado que presenta muchas más ventajas, en cuanto a potencia, tamaño y mantenimiento se refiere.

En España existen líneas de alta velocidad electrificadas tanto en CA a 25kV y 50Hz como en CC a 3000V. Los modelos de alta velocidad con posibilidad de alimentarse de dos líneas distintas,

permite el intercambio de trenes entre los distintos trayectos, haciendo más factible montar motores de CA trifásicos que los de CC.

4. Características generales del servicio actual

El servicio ferroviario internacional Posadas-Encarnación es prestado por la empresa privada Casimiro Zbikoski S.A. el cual consiste en el transporte de pasajeros desde la estación ferroviaria de Posadas (Misiones, Argentina.), hasta la estación ferroviaria de Encarnación (Itapúa, Paraguay), pasando a través del puente internacional San Roque González de Santa Cruz. La Fig. 4 muestra el recorrido hecho por el sistema ferroviario actual, que forma parte del ferrocarril General Urquiza y utiliza una trocha estándar de 1435 mm.



Fig. 4. Trayecto en tren desde Posadas hasta Encarnación.
Fuente: Elaboración propia.

Se realizan aproximadamente 47 viajes de ida y vuelta por día en un trayecto de 4,36 km entre estaciones y se realiza en menos de 8 minutos, disponiendo de 7 minutos de descanso entre trasbordos de la locomotora. Una vez concluido el servicio diario, el vehículo ferroviario se dirige a la estación de tren del municipio de Garupá, realizando 20km sobre las vías costeano el río Paraná.

El vehículo ferroviario consiste en una dupla de coches con motores diésel-hidráulicos Wadloper modelo DH 2, fabricados por la empresa alemana DÜWAG durante los años 1981 y 1983, los cuales trabajan acoplados espalda con espalda. Tienen un peso aproximado de 69 toneladas y cada locomotora una potencia de 212 kW, pudiendo alcanzar una velocidad de 65 km/h sobre el puente consumiendo en promedio 150 litros diarios de combustible tipo Diesel 500. La capacidad de pasajeros sentados es de 150 pero en el servicio Posadas-Encarnación se permiten pasajeros parados, alcanzando un máximo de 190 pasajeros por viaje.

El mantenimiento consiste en controlar todos los parámetros de un motor de combustión interna, y se realiza todos los días. Cada 2 horas de servicio se realizan inspecciones sobre los ejes, control de la temperatura del motor y condiciones generales del vehículo.

5. Tracción eléctrica y tracción Diésel: cuestiones ambientales

Hoy en día resulta inviable pensar en un proyecto de ingeniería sin contemplar su impacto ambiental. Cuando se trata del transporte de carga o de pasajeros, cualquiera sea éste, se deben tener en cuenta efectos ambientales como ser: ruido, derrames de combustibles y/o aceites, consumo de

energía que puede o no contribuir al agotamiento de combustibles fósiles, contaminación visual, emisiones de gases de efecto invernadero, entre otros. Todos estos aspectos son importantes pero lo verdaderamente relevante del uso de la energía para el transporte es la contribución del agotamiento de las fuentes fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero.

El estudio ambiental que se enmarca en el uso de la energía está directamente ligado a la matriz energética y el mix de generación de un país.

La cuestión a resolver es de electrificar o no una línea ferroviaria, generando la justificación y concientización del por qué resultaría beneficioso.

El consumo de la energía, sea esta eléctrica o Diésel, produce los mismos efectos, sin embargo, existen diferencias en cuanto a:

- Cantidad de energía perdida en los procesos de transformación y transporte de la energía antes de llegar al vehículo y en los rendimientos del propio vehículo.

- Origen de la energía empleada, lo que se concreta en la posibilidad de utilizar energías renovables y sin emisiones de gases de efecto invernadero en la tracción eléctrica, pero no en la Diésel.

- Posibilidad de emplear el freno regenerativo en la tracción eléctrica y, por tanto, de reducir el consumo neto de energía y las emisiones.

En la tracción diésel las pérdidas en el vehículo son muy altas y las pérdidas antes de llegar al vehículo son menores. En tracción eléctrica es exactamente al revés.

La compañía Schaeffler indica lo siguiente en cuanto al transporte sostenible: “no sólo el concepto de propulsión de un vehículo es de crucial importancia. Igual de importante es el modo en el que se genera y almacena la energía necesaria para la propulsión, de lo contrario, existe el riesgo de que las emisiones de CO₂ simplemente se trasladen de un lugar a otro. La movilidad sostenible sólo será posible cuando la energía primaria para la locomoción proceda de fuentes renovables como la energía eólica, la energía solar, la energía hidroeléctrica o la energía geotérmica”. Sin embargo, también resalta: “El motor de combustión interna seguirá siendo un elemento importante en el transporte de personas y mercancías. Esto no solo se refiere a turismos sino, sobre todo, a vehículos comerciales, barcos y aviones para los que, en un futuro próximo, no habrá una alternativa eléctrica viable con baterías”.

Resaltando nuevamente lo dicho en el segundo párrafo y lo visto hasta el momento se puede visualizar que, si la tracción es Diésel, los valores de consumo de combustibles fósiles y emisiones de gases de efecto invernadero, al estado actual de la tecnología, serán siempre iguales, sin embargo, en el empleo de la tracción eléctrica se reduciría notablemente si el mix de generación fuera mayormente renovable y haciendo uso de frenos regenerativos.

6. Conclusiones

El desarrollo de este trabajo pone en vista las características principales que diferencian las distintas tecnologías utilizadas para la tracción eléctrica en ferrocarriles. Los problemas de confiabilidad del tercer riel lo ponen en desventaja frente a la catenaria cuando se plantean proyectos a la intemperie. Además, el tercer riel es un conductor de gran sección que para energizar en CA se debe tener en cuenta el efecto pelicular que se da en frecuencias industriales. El riesgo eléctrico presente en los sistemas de tercer riel también obliga a tener en cuenta mecanismos de

energización más sofisticados, donde sólo las secciones debajo del tren se encuentran bajo tensión. Sin embargo, representa la mejor alternativa en aquellos emprendimientos donde no se desee la contaminación visual que ocasiona el sistema con catenaria.

Para los servicios de alta velocidad predomina la alimentación en CA, ya que son necesarias mayores tensiones para combatir las grandes pérdidas causadas por los grandes consumos de potencia de estos sistemas. La CC ha quedado prácticamente relegada a servicios de baja velocidad localizados en cercanías, ya que no permite alcanzar tensiones mayores a 3 kV.

Las ventajas ambientales de la tracción eléctrica se dan sólo en aquellos casos en que la energía eléctrica utilizada para alimentar el servicio ferroviario proviene de fuentes de energías renovables. Además, la energía cinética y potencial que se le brinda al tren en los momentos de consumo pueden ser recuperados en parte a través del proceso de frenado.

En la Argentina, las vías ferroviarias y estaciones son propiedad del estado. Los servicios ferroviarios son brindados por empresas privadas a través de una concesión otorgada por empresas estatales y controladas por organismos creados a tales efectos.

En vista lo de reconocido hasta aquí, todo apunta a que el proyecto de electrificación del servicio ferroviario actual es realizable. En términos de impacto ambiental brinda ventajas, pero siempre ligado a la matriz energética que lo alimenta. En términos legales no existen restricciones a la utilización de tracción eléctrica ni a las instalaciones requeridas para ello. En términos técnicos la tecnología necesaria está desarrollada y se encuentra disponible. En términos económicos se observa que la implementación de tracción eléctrica puede llegar a ser más costosa que la tracción diesel, pero se requiere una evaluación más detallada de su relación costo-beneficio.

7. Referencias

- [1] ABAD, Gonzalo. "Power electronics and electric drives for traction application". España, ISBN: 9781118954423, 2017.
- [2] ÁLVAREZ, Alberto García. "Comparación medioambiental entre la tracción eléctrica y la tracción diésel en el ferrocarril". p. 56-63, en.-feb. 2009.
- [3] ÁLVARO, Fiel Calleja. "Sistema de tracción eléctrica ferroviaria". Trabajo de Fin de Grado. Universidad de Valladolid escuela de ingenierías industriales. 174 p. Valladolid, noviembre 2016.
- [4] BERNAL DURAND, M. Luz et al. "Análisis jurídico del sistema ferroviario Nacional". Universidad Nacional del COMAHUE. Disponible en: prensa.uncoma.edu.ar/index.php/es/novedades/30-novedades/3090-estudiantes-de-ingenieria-de-la-unco-analizaron-el-sistema-ferroviario-argentino-cuarta-parte?&cal_offset=-1n.
- [5] YVES, Machefert T. "Histoire de la traction electrique". París: Francia, s.n.
- [6] Ley Nacional N°22, "Ferrocarriles Argentinos". Diario Oficial de la República Argentina, (21-jun-1855).
- [7] Ley Nacional N°531, "Ferrocarriles Nacionales". Diario Oficial de la República Argentina, (09-sep-1872).
- [8] Ley Nacional N°2873, "Ferrocarriles Nacionales". Diario Oficial de la República Argentina, (18-nov-1891).
- [9] Ley Nacional N°5315, "Ferrocarriles. Ley sobre concesiones de ferrocarriles". Diario Oficial de la República Argentina, (01-oct-1907).
- [10] Ley Nacional N°23696, "Reforma del Estado". Diario Oficial de la República Argentina, (17-ago-1989).
- [11] Ley Nacional N°26352, "Actividad ferroviaria". Diario Oficial de la República Argentina, (28-feb-2008).