

Nota Técnica. Principales fenómenos de calidad de energía observados en trenes eléctricos

Autor: Adrián Cordero Méndez, B82305

Sinopsis

Este artículo explora la calidad de energía en trenes eléctricos, enfocándose en los principales defectos observados en sus sistemas de potencia. Se analizan los principales impactos en la red eléctrica y el sistema propio: armónicos, inestabilidad armónica y fluctuaciones de frecuencia baja. Organización: primero se cubren generalidades (tipos de trenes, arquitecturas de alimentación y componentes principales); luego, se muestran problemas específicos de calidad de potencia en sistemas ferroviarios en corriente alterna, con alimentación de 25 kV a 50 Hz o 15 kV a 16.7 Hz y ejemplos correspondientes; finalmente, las conclusiones resumen los fenómenos y los impactos asociados.

Generalidades de Sistemas de Potencia en Trenes

Los primeros trenes eléctricos, definidos como trenes que utilizan motores eléctricos para la tracción, utilizaban energía en corriente directa (DC) [2]. Con el auge de los motores de jaula de ardilla, se empezó la transición a suministro de energía en corriente alterna (AC). Este cambio sucedió principalmente por el abaratamiento de los costos de manufactura y mantenimiento de este tipo de sistemas [1].

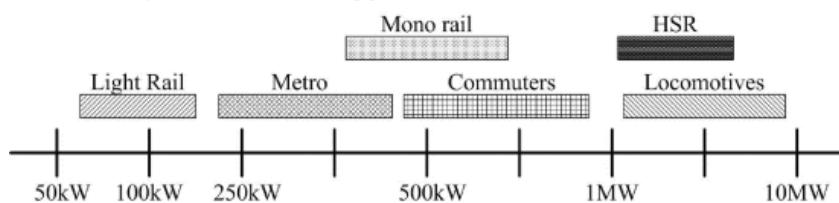


Figura 1. Tipos de trenes según consumo energético. Recuperado de [1]

Los sistemas ferroviarios eléctricos pueden ser catalogados según la cantidad de energía que consumen. La Figura 1 muestra algunos tipos de trenes según este parámetro. A continuación, y de forma breve, se menciona el funcionamiento básico de las máquinas según su alimentación

- **Diesel.** Este tipo de trenes usan diesel como combustible y generadores síncronos para generar tracción.
- **Alimentadas por DC.** Se utiliza en aplicaciones de poca energía, como en el *Light Rail*. Este tipo de máquinas alcanzan velocidades de entre 30 y 50 km/h. Utilizan voltajes entre 600 y 3000 V [2].
- **Alimentadas por AC.** Finalmente, este tipo de dispositivos utilizan frecuencias y voltajes que varían según la aplicación (trenes de alta velocidad) y los estándares locales.

Para la investigación sobre los principales fenómenos se analizarán los observados en interacciones de máquinas alimentadas por AC [2], ya que son similares a los planteados en propuestas de proyectos actuales, o recientes, considerados para implementación en Costa Rica.

Los sistemas alimentados por AC pueden ser categorizados en sistemas impulsados por locomotoras y sistemas de tracción distribuída. Según su nombre indica, esta clasificación se basa en el mecanismo mediante el cuál se impulsan los trenes, siendo el primero guiado por un carro principal y otros que le siguen; y la segunda, varios carros tienen motores y se distribuye la tarea de aceleración y frenado entre los distintos carros. Las arquitecturas de cada uno de estos sistemas se puede observar en la Figura 6.

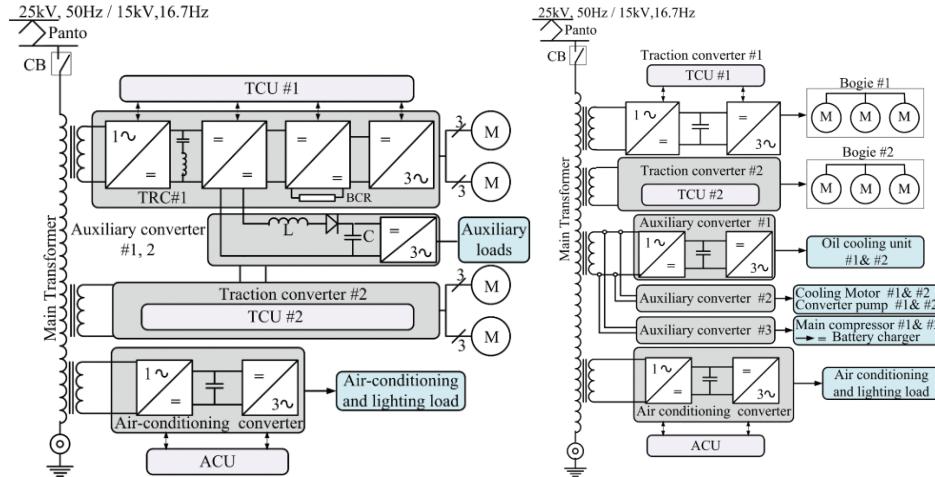


Figura 2. Arquitecturas de distribución de energía en trenes AC (EMU a la izquierda y Locomotora a la derecha). Recuperado de [1]

Los convertidores utilizados en los sistemas de tracción modernos son generalmente convertidores de cuatro cuadrantes (4QC), ya que permiten el flujo bidireccional de energía en ambas polaridades de conexión. Además, se utiliza control PWM para la velocidad de los motores de inducción, que son, en la actualidad, la opción más común para este tipo de aplicaciones, debido a su bajo costo de adquisición y operación [2].

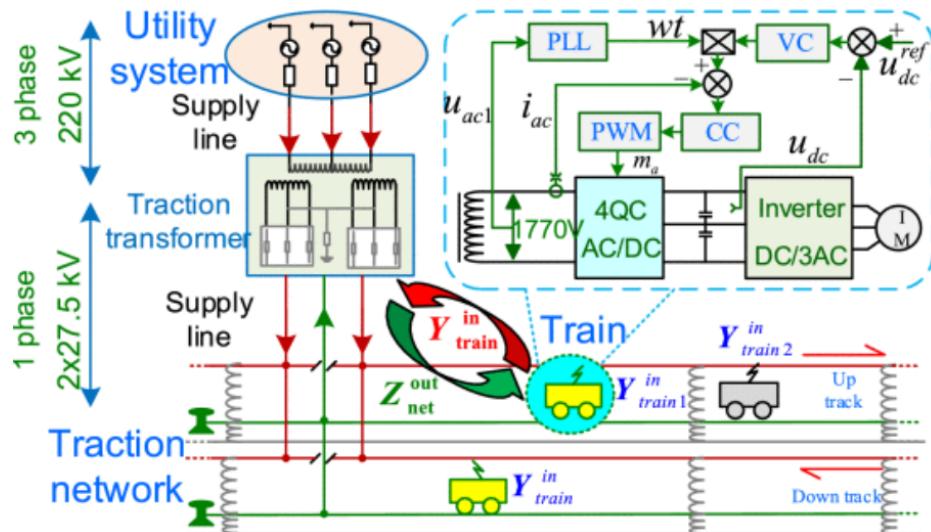


Figura 3. Componentes de un sistema eléctrico ferroviario. Recuperado de [9]

Por su parte, se puede considerar el sistema de utilidad como el sistema de catenaria y subestación de potencia que permite llevar la energía al tren [9]. Las características principales de esta sección de la transferencia de energía es que está compuesta por uno o varios transformadores que reducen la potencia desde 220 kV o similar hasta 25 kV a 50 Hz o 15 kV a 16.7 Hz, y de 3 fases a una fase por catenaria. La energía es luego traspasada al tren a través de la catenaria que está generalmente ubicada sobre el ferrocarril. Otra opción para la ubicación de la catenaria es en un riel intermedio, lo que permite eliminar efectos de potencia reactiva creados por la distancia entre los rieles y la catenaria aérea [2]. Sin embargo, los sistemas de catenaria con riel tienen restricciones en términos de potencia, por razones de seguridad. Como referencia se presenta la Figura 3, resumiendo los principales componentes de un sistema eléctrico ferroviario.

Principales Fenómenos

En la literatura se encuentran 3 tipos principales de eventos que afectan la calidad de la energía: fluctuaciones de baja frecuencia, distorsiones armónicas e inestabilidad armónica [3], [9]. En esta sección se explican las tres categorías y se muestran ejemplos observados en distintos sistemas ferroviarios en el mundo.

Distorsiones Armónicas

Las distorsiones armónicas se dan cuando los parámetros de la red eléctrica del tren resuenan con la frecuencia del sistema eléctrico abordo, este incluye tanto los sistemas auxiliares como la alimentación del sistema de tracción. En sistemas ferroviarios eléctricos estos van desde unos cuantos cientos de Hz hasta kHz, y son generalmente atribuidos a convertidores utilizados para la alimentación de sistemas auxiliares en el tren y los convertidores de cuatro cuadrantes (4QC) utilizados para la alimentación del sistema de tracción [3], [5]. La Tabla 1 muestra algunos casos que se han observado.

Tabla 1. Casos de estudio sobre resonancia armónica en sistemas ferroviarios eléctricos

Caso	Descripción
Beijing–Harbin (2007)	Cuando el Tren de Rápida Velocidad (TRV) se puso en operación, hubo fluctuaciones inusuales de voltaje en la subestación correspondiente, en el que el voltaje llegó a valores de 1.3 a 2.7 pu [3]. Es importante mencionar que no se hace referencia a la duración temporal de estos acontecimientos.
Hefei–Nanjing and Hefei–Wuhan (2008)	Explosión de protecciones contra rayos en los trenes por alto contenido armónico. [3]
Italia (2010)	Como parte de un estudio de fenómenos de calidad de la energía en trenes, se colocó un analizador por tres días y se encontraron eventos de resonancia armónica, en particular alrededor de la armónica 21. El estudio se lo atribuye a las unidades <i>Uninterrupted Power Supply</i> (UPS) utilizadas para la alimentación de circuitos auxiliares, debido a su comportamiento no lineal [5]. Sin embargo, no se especifica el tipo de UPS utilizada lo que limita la posible interpretación del evento.

Se pudieron encontrar muestras del fenómeno, presentadas en la Figura 4 y 5.

La Figura 4 muestra dos eventos de resonancia del voltaje que amplifican la armónica 21, en este caso no se tuvo impactos significativos [3], no obstante es importante resaltar que este tipo de variaciones pueden tener implicaciones severas por el múltiple cruce por 0 de la señal de voltaje.

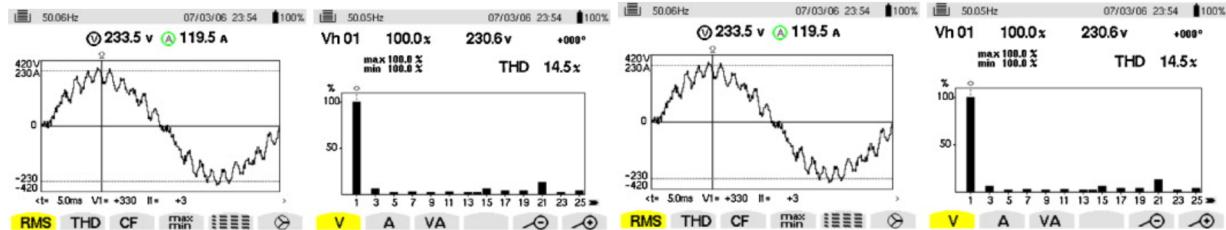


Figura 4. Fenómenos de resonancia armónica observados en una línea ferroviaria italiana. Recuperado de [5]

Por su parte, la Figura 5 muestra la firma de contenido armónico de dos tipos de locomotoras en China. La principal diferencia entre estas es el tipo de convertidor que utilizan, pues las nuevas utilizan convertidores 4QC para permitir la carga durante la etapa de frenado del tren, además de que utilizan señales PWM para el control de los motores. Las locomotoras más antiguas utilizan convertidores de tres etapas con tiristores.

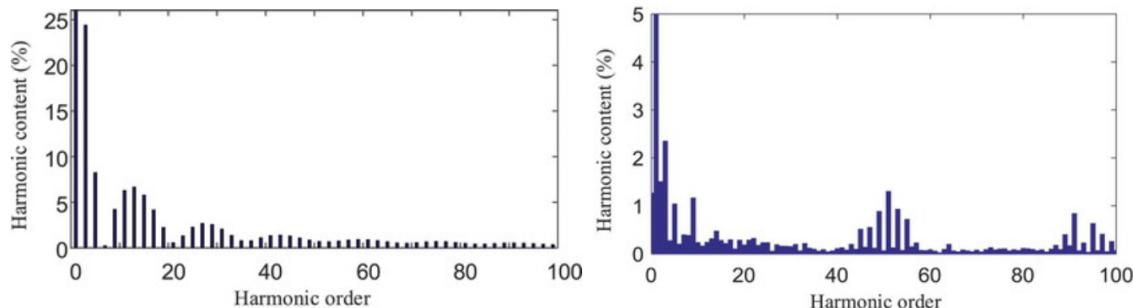


Figura 5. A la izquierda se observa el espectro de frecuencia de una locomotora eléctrica convencional (convertidor de tres etapas con tiristores). A la derecha se muestra el de una de las locomotoras utilizadas en transporte rápido (con 4QC, utilizando IGBTs). Recuperado de [3]

Inestabilidad armónica

Por su parte, la inestabilidad armónica tiene raíz, de forma similar, en los problemas de resonancia, sin embargo, se distingue en la literatura debido al impacto que tiene en la estabilidad de la red completa [6]. La fuente principal de este fenómeno es la gran cantidad de elementos no lineales en los otros componentes del sistema, incluyendo la interacción entre múltiples trenes conectados a la misma red. Debido a esto, el fenómeno es complejo de analizar, pues la interacción de los armónicos se ve afectada por los distintos trenes y los convertidores que tengan, así como la distancia que haya entre ellos, ambos casos difíciles de analizar en redes ferroviarias complejas. Este tipo de problemas llevaron a la implementación de estándares que crean limitaciones a la introducción de nuevas locomotoras en los sistemas como la norma EN50388-2012. Donde se establecen límites a las armónicas permitidas y,

crucialmente, análisis de la impedancia de entrada, para reducir la posibilidad de resonancia armónica que lleve a la desestabilización del sistema [10]. En la Tabla 2, se observa el principal ejemplo relacionado a este tipo de fenómeno. Es importante mencionar que este es también un buen ejemplo de estabilidad en sistemas de control, en este caso, ligados directamente a un fenómeno de calidad de energía y con implicaciones directas en la operación diaria de un sistema de transporte masivo.

Tabla 2. Casos de estudio sobre inestabilidad armónica en sistemas ferroviarios eléctricos

Caso	Descripción
Zurich, Suiza (1995)	Durante 1995, en Zurich, se presentaron varias instancias en las que los trenes se detenían sin explicación. Estos eventos coincidieron con la introducción a la red ferroviaria de locomotoras más nuevas con control PWM. Se comprobó que en ocasiones en las que las locomotoras viejas coincidían con las nuevas, no se presentaba el fenómeno. Para solucionar el problema de compatibilidad se exigió incrementar la carga reactiva para limitar el efecto de los componentes armónicos de los elementos no lineales. [7]

Distorsiones de Frecuencia Baja

Finalmente, se designa como distorsión de frecuencia baja a los fenómenos de frecuencias de unos cuántos Hz que distorsionan la onda de energía entregada por la catenaria. Este fenómeno se observa en el sistema de utilidad y se pueden clasificar en 2 posibles fuentes: por convertidor rotativo y otros. El convertidor rotativo es un convertidor de frecuencia utilizado, principalmente, en sistemas europeos más antiguos que inyecta una fluctuación de voltaje por las características electromagnéticas y mecánicas del convertidor, como el caso de Noruega de la Tabla 3 [8]. Por otro lado, se han observado casos como el relacionado al sistema en Shandong, que ocurren en sistemas de potencia que funcionan muy cerca de su máxima capacidad [9]. Este último fenómeno es similar al de flickers, donde se observa cómo la capacidad de la subestación impacta directamente en el nivel de la fluctuación, al punto en el cual el sistema colapsa, resultando en la desconexión de las locomotoras, cuando la cantidad de trenes crece, ver Figura 6. En la Tabla 3, se observan los ejemplos relacionados a este tipo de fenómeno.

Tabla 3. Casos de estudio sobre oscilaciones de baja frecuencia en sistemas ferroviarios eléctricos

Caso	Descripción
Noruega (2007)	El fenómeno fue observado en Noruega, que implementó el uso de convertidores rotativos para alimentar las líneas ferroviarias. Este tipo de convertidores funciona similar a un motor, utilizando movimiento giratorio, cuya inercia es la razón de las variaciones en el nivel de voltaje. [8]
Shandong, China (s.f.)	En este caso, el fenómeno se observa en un almacén de trenes, al iniciar la jornada laboral, conforme se conectan más trenes a la red, se empiezan a observar las limitaciones en la capacidad de la subestación, resultando en fluctuaciones significativas, ver Figura 6. En este caso se puede observar cómo la red termina de desestabilizarse con 7 trenes. [9]

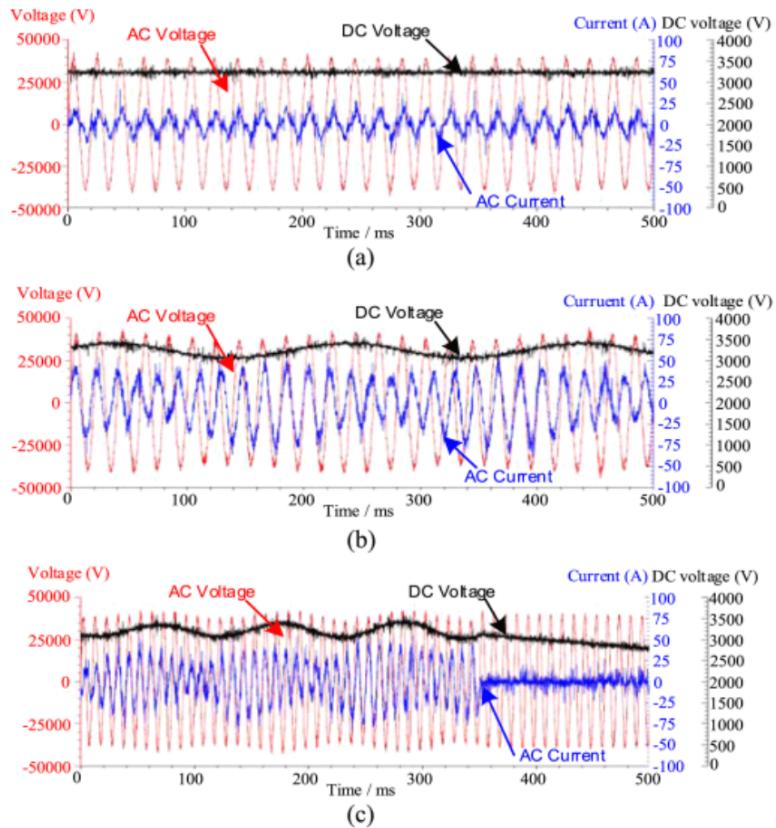


Figura 6. Voltaje en la subestación de Cangkou, Shandong, según cantidad de trenes en uso.
a) menos de 5 trenes. b) 6 trenes. c) 7 trenes. Recuperado de [9]

Conclusión

Los sistemas ferroviarios eléctricos presentan variedad de problemas de calidad de energía, se identificaron en esta investigación bibliográfica 3 tipos principales. Se explicaron brevemente sus principales causas y cómo resultan en problemas de funcionamiento. Debido a la gran complejidad de los sistemas ferroviarios eléctricos, principalmente por la variedad de arquitecturas de alimentación del sistema de tracción y a sistemas auxiliares, surgen como soluciones importantes asegurar la capacidad de la red y comprobar la compatibilidad de la red actual al introducir maquinaria nueva. Esto se puede dar analizando las características armónicas de los equipos nuevos, sin embargo, manteniendo en consideración la estabilidad del sistema. Por su parte, para evitar fluctuaciones de baja frecuencia, se recomienda verificación de la capacidad de la red y el uso de convertidores estáticos. Finalmente, para futuras investigaciones se mantiene la posibilidad de profundizar en los aspectos técnicos de alguno de estos problemas.

Referencias

- [1] D. Ronanki, S. A. Singh, and S. S. Williamson, "Comprehensive Topological Overview of Rolling Stock Architectures and Recent Trends in Electric Railway Traction Systems," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 3, no. 3, pp. 724–738, Sept. 2017, doi: 10.1109/TTE.2017.2703583.
- [2] A. Ruvio et al., "An Overview on Urban Rail Transport Technologies," in 2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), June 2022, pp. 1–6, doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope54979.2022.9854666.
- [3] Z. He, Z. Zheng, and H. Hu, "Power quality in high-speed railway systems," *International Journal of Rail Transportation*, vol. 4, no. 2, pp. 71–97, Apr. 2016, doi: 10.1080/23248378.2016.1169228.
- [4] K. Wang, H. Hu, C. Chen, Z. He, and L. Chen, "A simulation platform to assess comprehensive power quality issues in electrified railways," *International Journal of Rail Transportation*, vol. 6, no. 4, pp. 233–254, Oct. 2018, doi: 10.1080/23248378.2018.1424046.
- [5] M. Brenna, A. Capasso, M. C. Falvo, F. Foiadelli, R. Lamedica, and D. Zaninelli, "Investigation of resonance phenomena in high speed railway supply systems: Theoretical and experimental analysis," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 10, pp. 1915–1923, Oct. 2011, doi: [10.1016/j.epsr.2011.05.017](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2011.05.017).
- [6] L. Harnefors, A. G. Yepes, A. Vidal, and J. Doval-Gandoy, "Passivity-Based Controller Design of Grid-Connected VSCs for Prevention of Electrical Resonance Instability," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 2, pp. 702–710, Feb. 2015, doi: [10.1109/TIE.2014.2336632](https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2336632).
- [7] E. Möllerstedt and B. Bernhardsson, "Out of control because of harmonics—An analysis of the harmonic response of an inverter locomotive," *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 20, no. 4, pp. 70–81, Aug. 2000
- [8] S. Danielsen, M. Molinas, T. Toftevaag, and O. B. Fosso, "Constant power load characteristic's influence on the low-frequency interaction between advanced electrical rail vehicle and railway traction power supply with rotary converters," *Electromotion*, vol. 17, no. 1, p. 61, Jan. 2010
- [9] H. Hu, H. Tao, F. Blaabjerg, X. Wang, Z. He, and S. Gao, "Train–Network Interactions and Stability Evaluation in High-Speed Railways—Part I: Phenomena and Modeling," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 6, pp. 4627–4642, June 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2781880.
- [10] "EN 50388:2012 - Railway Applications - Power supply and rolling stock - Technical criteria for the coordination between power supply (substation) and rolling stock to achieve interoperability," iTeh Standards. Accessed: Dec. 05, 2025. [Online]. Available: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/fd5d3267-2aed-42f9-add6-d7bfac78762/en-50388-2012>