



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

FERROCARRILES

DR. JAIME DE JESUS PAREDES CAMACHO

GRUPO 01

PROYECTO FINAL “EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA EN
FERROCARRILES”

ANDRÉS HERNÁNDEZ CASILLAS

Índice

Introducción	3
Ferrocarril de vapor.....	4
Ferrocarril con Diésel	7
Ferrocarriles Eléctricos	10
Tipos de locomotoras eléctricas.....	11
Funcionamiento de la locomotora eléctrica de CC.....	11
Energía Solar	12
¿Pueden impulsarse los trenes únicamente con energía solar?.....	13
Tren eólico	14
Doblemente alimentado (Doubly –fed) ... iError! Marcador no definido.	
Convertidor de Plena potencia.....	15
Tren levitación magnética.....	17
¿Cómo funciona el tren de levitación magnética?	18
Implementación del tren magnético en distintos países	20
Tren de hidrógeno	21
Cuadro comparativo de la evolución de las energías utilizadas en Ferrocarriles	23
Conclusiones	25

Introducción

La principal motivación personal para elegir este tema es conjugar mi interés por la materia de Ferrocarriles.

La sustentabilidad energética y ambiental en el transporte ha recibido mucha atención en las últimas décadas. El Informe de Síntesis del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático indicó que el sector del transporte fue responsable de aproximadamente el 23 % de las emisiones totales de CO₂ relacionadas con la energía en todo el mundo en 2014¹. En comparación con otras formas de transporte, el ferrocarril desempeña un papel importante en la reducción del impacto ambiental y la mejora de la eficiencia energética. Al ofrecer un transporte eficiente con bajo impacto ambiental, el ferrocarril ayuda a crear un enfoque más sostenible del transporte.

Aunque podría decirse que el sistema ferroviario es una de las formas más eficientes de transporte terrestre, la forma de operar los trenes de manera más eficiente sigue siendo de importancia mundial. Para mejorar la sostenibilidad, los miembros de la Unión Internacional de Ferrocarriles y la Comunidad de Empresas Europeas de Ferrocarriles e Infraestructura propusieron un enfoque unificado de los temas medioambientales y de sostenibilidad en el sector ferroviario europeo en 2010². Abordaron cuatro objetivos para el sector ferroviario para mejorar el desempeño en términos ambientales, incluida la protección del clima, la eficiencia energética, las emisiones de escape y el ruido. Las compañías ferroviarias europeas acordaron reducir las emisiones medias específicas de CO₂ de la operación de trenes en un 50 % en 2030, en comparación con las emisiones de 1990.

Debido a la importancia de la energía ferroviaria y el alto potencial para reducir la energía consumo en los sistemas ferroviarios, este trabajo investiga más a fondo alternativas en el uso de la energía en sistemas ferroviarios.

¹ R. Sims, R. Schaeffer, and F. Creutzig, "Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change," IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press 2014.

² UIC and CER, "Moving towards sustainable mobility: A strategy for 2030 and beyond for the European railway sector," UIC Communications Department 2012

Ferrocarril de vapor

En la búsqueda incesante de fuentes de energía, la invención de la máquina de vapor cambió la faz de la tierra. (Siegel, Prefacio) La máquina de vapor fue la principal fuente de energía durante la Revolución Industrial Británica en el siglo XVIII. La máquina de vapor abrió un mundo completamente nuevo para todos. La máquina de vapor maximizó la producción, la eficiencia, la confiabilidad, minimizó el tiempo, la cantidad de mano de obra y el uso de animales. La máquina de vapor en todos revolucionó el hemisferio oriental, principalmente la sociedad europea.

La máquina de vapor provocó específicamente un cambio radical en el trabajo, el transporte de mercancías y los viajes. La invención de la máquina de vapor revolucionó la sociedad europea al permitir que las tareas se realizaran de manera más rápida, económica y confiable. El uso de la máquina de vapor en varias profesiones revolucionó numerosos aspectos de la sociedad europea occidental.

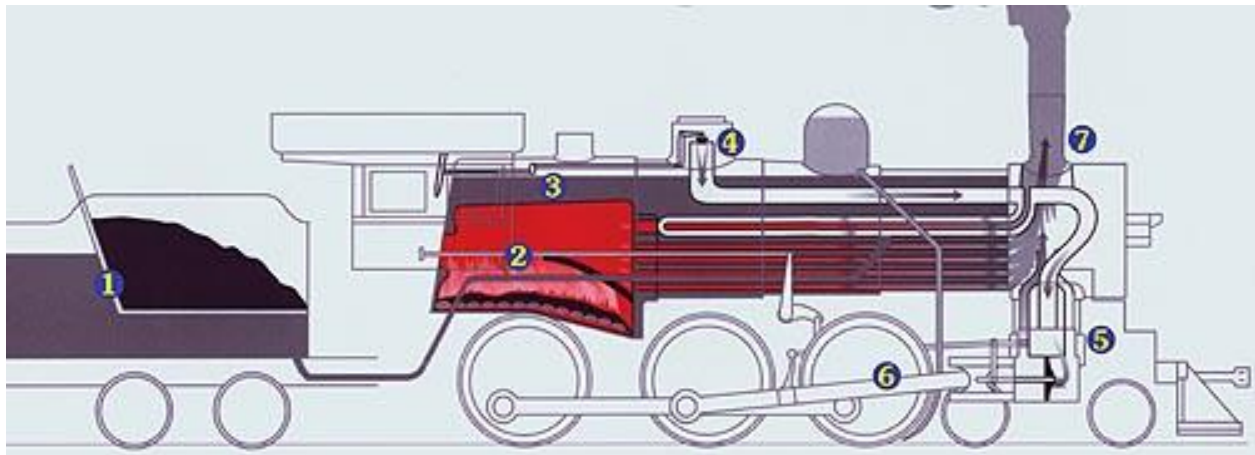
El primer uso importante de la máquina de vapor se produjo en 1776. La máquina de vapor se utilizó para mostrar a los mineros de Cornualles el éxito que podía tener en la extracción del agua de los pozos de las minas.

Dado que la industria minera del carbón tenía que mantenerse al día, se utilizó energía de vapor para extraer carbón, lo que resultó ser mucho más rápido que los métodos habituales. Debido a que la máquina de vapor se usó para extraer carbón, y debido a que Inglaterra tenía grandes depósitos de carbón para alimentar las nuevas máquinas de vapor, permitió a las personas usar más máquinas y construir fábricas más grandes.. Más máquinas y fábricas que usaban la máquina de vapor significaban más producción, más confiabilidad y precios más baratos. La industria del acero también se revolucionó con el uso de la máquina de vapor.³

³ Essay Examples. (February 2019). The Steam Engine Essay. Retrieved from <https://benjaminbarber.org/the-steam-engine-essay/>

Los suministros de combustible (generalmente carbón, pero a veces aceite) y agua podían transportarse en el propio bastidor de la locomotora (en cuyo caso se llamaba motor tanque) o en un vehículo separado, el téneder, acoplado a la locomotora.

Cuando se calienta, el agua se convierte en un vapor invisible conocido como vapor. El volumen de agua se expande a medida que se convierte en vapor dentro de la caldera, creando una alta presión. La expansión del vapor empuja los pistones que se conectan a las ruedas motrices que hacen funcionar la locomotora.



1. El carbón o el petróleo son los combustibles que se utilizan para calentar el agua (el carbón se muestra en el diagrama). El carbón se transporta en el téneder de la locomotora y el bombero lo empuja a mano a la cámara de combustión. El agua se transporta en la licitación en un tanque que rodea el carbón. El agua pasa a la locomotora a través de un dispositivo llamado inyector.⁴
2. Al esparcir el carbón de manera uniforme por toda la cámara de combustión, el bombero crea un fuego nivelado por encima de las parrillas. El aire fluye hacia arriba a través de las rejillas, lo que permite que el carbón se queme más caliente. Los gases calientes liberados del carbón fluyen hacia adelante a través de una serie de conductos de humos o tubos hacia la parte delantera de la locomotora.

⁴ Railway Museum. (2022). What Makes A Steam Locomotive Work?. , de Mid-Continent Railway Museum Sitio web: <https://www.midcontinent.org/kids-page/what-makes-a-steam-locomotive-work/#:~:text=When%20heated%2C%20water%20turns%20to,wheels%20that%20operate%20the%20locomotive.>

3. El agua rodea el exterior de la cámara de combustión. El calor del carbón encendido convierte el agua en vapor, que sube a la parte superior de la caldera. El área que rodea la caja de fuego y los tubos es el “generador de vapor” de la locomotora.
4. El vapor se acumula en la cúpula de vapor, el punto más alto de la caldera. El ingeniero usa el acelerador para regular la cantidad de vapor que se envía a los pistones. Una palanca del acelerador en la cabina abre y cierra la válvula del acelerador en el domo de vapor.
5. El vapor pasa a las válvulas de pistón que controlan la admisión de vapor a los cilindros. Una vez en el pistón, el vapor se expande, empujándolo en la dirección opuesta. Al final de la carrera del pistón, se abre un puerto de escape que permite que escape el vapor. Luego, el proceso se invierte y se repite en la dirección opuesta. El vapor se admite a ambos lados del pistón para que siempre esté bajo potencia. Una palanca en la cabina permite al maquinista controlar la acción de las válvulas del pistón (dirección del movimiento de la locomotora y sincronización).
6. Los pistones empujan o tiran de las varillas conectadas a las ruedas motrices, proporcionando la fuerza necesaria para mover la locomotora.
7. El vapor sale a través de una boquilla y sube a través de la caja de humo hacia la chimenea. Se produce una corriente de aire o vacío, tirando aire a través de las rejillas de la cámara de combustión para inducir la combustión del carbón. Tanto el vapor agotado como el humo del carbón ascienden a través de la chimenea.

Aún con toda la innovación tecnológica del momento, la eficiencia térmica incluso de las locomotoras de vapor más avanzadas rara vez superó el 6 por ciento. La combustión incompleta y las pérdidas de calor de la cámara de combustión, la caldera, los cilindros y otros lugares disiparon la mayor parte de la energía del combustible quemado. Por esta razón, la locomotora de vapor se volvió obsoleta, pero solo lentamente, porque tenía ventajas compensatorias, en particular su simplicidad y capacidad para resistir el abuso.

Ferrocarril con Diésel

A fines de la década de 1960, el diésel había reemplazado casi por completo al vapor como la fuerza motriz ferroviaria estándar en las líneas no electrificadas de todo el mundo. El cambio se produjo primero y más rápidamente en América del Norte, los ferrocarriles de los Estados Unidos reemplazaron por completo sus locomotoras de vapor. Lo que hizo que el diésel reemplazara a la locomotora de vapor tan rápidamente fue la presión de la competencia de otros modos de transporte y el aumento continuo de los costos salariales, lo que obligó a los ferrocarriles a mejorar sus servicios y adoptar todas las medidas posibles para aumentar la eficiencia operativa. En comparación con el vapor, la unidad de tracción diésel tenía una serie de ventajas importantes:⁵

1. Podría funcionar durante largos períodos sin pérdida de tiempo para el mantenimiento; por lo tanto, en América del Norte, el diésel podría funcionar en un recorrido de 3200 km o más y luego, después del servicio, comenzar el viaje de regreso. Las locomotoras de vapor requerían un servicio extenso después de solo unas pocas horas de funcionamiento.
2. Utilizaba menos energía de combustible que una locomotora de vapor, ya que su eficiencia térmica era unas cuatro veces mayor.
3. Podría acelerar un tren más rápidamente y operar a velocidades sostenidas más altas con menos daño a la vía.

Los sistemas diésel-eléctricos son cinco veces más eficientes que las antiguas locomotoras a vapor, razón por la cual el diésel reemplazó por completo al vapor a principios del siglo XX.

El diésel también ha visto cierta competencia de los trenes totalmente eléctricos, que tiran directamente de una red eléctrica mientras conducen.

Aunque el motor diésel ha mejorado mucho en cuanto a potencia y rendimiento, los principios básicos siguen siendo los mismos: introducir aire en el cilindro, comprimirlo

⁵ Shedd, T. Clark and Allen, . Geoffrey Freeman (2021, December 17). *locomotive*. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/technology/locomotive-vehicle>

para que aumente su temperatura y luego inyectar una pequeña cantidad de aceite en el cilindro. El aceite se enciende sin chispa debido a la alta temperatura.

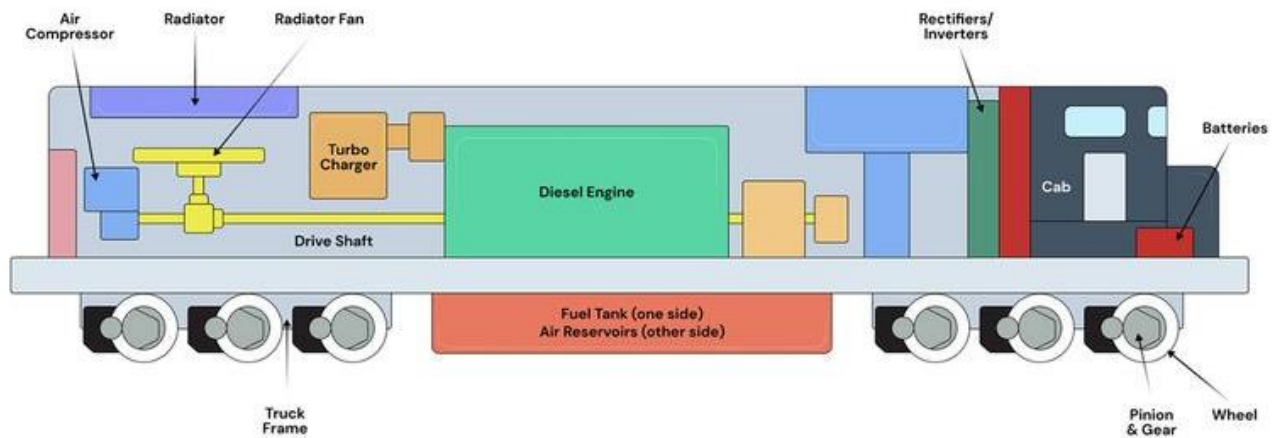


Imagen usada de: Karim Nice & Talon Homer "How Diesel Locomotives Work" 22 May 2001. HowStuffWorks.com. <<https://science.howstuffworks.com/transport/engines-equipment/diesel-locomotive.htm>> 16 May 2022

Cab

La cabina de la locomotora se desplaza sobre su propio sistema de suspensión, lo que ayuda a aislar al maquinista de los golpes. Los asientos también tienen un sistema de suspensión. Dentro de la cabina hay un pequeño espacio de trabajo con solo unos pocos asientos. Por lo general, la cabina solo está ocupada por un ingeniero y un conductor.

Head-end Power Unit

La unidad de potencia de cabecera (HEP, por sus siglas en inglés) consta de otro gran motor diésel, que a su vez puede generar entre 3000 y 4000 caballos de fuerza. Tiende a girar incluso más lento que el motor principal, alcanzando un máximo de aproximadamente 1,000 rpm. El motor impulsa un generador que proporciona energía de CA trifásica de 480 voltios para el resto del tren. (Nice, Karim, 2001)

Al usar un motor y un generador completamente separados para estos sistemas, el tren puede mantener cómodos a los pasajeros incluso si falla el motor principal. También disminuye la carga en el motor principal. Además, muchas locomotoras modernas tienen sistemas electrónicos que permiten enviar la potencia del motor secundario a los motores de tracción, o la potencia del motor principal al HEP, según las necesidades energéticas actuales.

Depósito de combustible

Este enorme tanque en la parte inferior de la locomotora contiene hasta 5500 galones (20 820 litros) de combustible diésel, más 300 galones (1135 litros) adicionales de refrigerante y 250 galones (946 litros) de aceite de motor. El tanque de combustible está compartimentado, por lo que, si algún compartimiento está dañado o comienza a tener fugas, las bombas pueden extraer el combustible de ese compartimiento.

Baterías

La locomotora funciona con un sistema eléctrico nominal de 64 voltios. La locomotora tiene ocho baterías de 8 voltios, cada una de las cuales pesa más de 300 libras (136 kilogramos). Estas baterías proporcionan la energía necesaria para arrancar el motor (tiene un motor de arranque enorme), así como para hacer funcionar los componentes electrónicos de la locomotora. Una vez que el motor principal está funcionando, un alternador suministra energía a la electrónica y las baterías.

El método de transmisión de energía más comúnmente empleado es el eléctrico, para convertir la energía mecánica producida por el motor diésel en corriente para motores de tracción eléctrica. Durante la mayor parte del siglo XX, el método universal consistía en acoplar el motor diésel a un generador de corriente continua, desde el cual, a través de los controles apropiados, se alimentaba la corriente a los motores.⁶

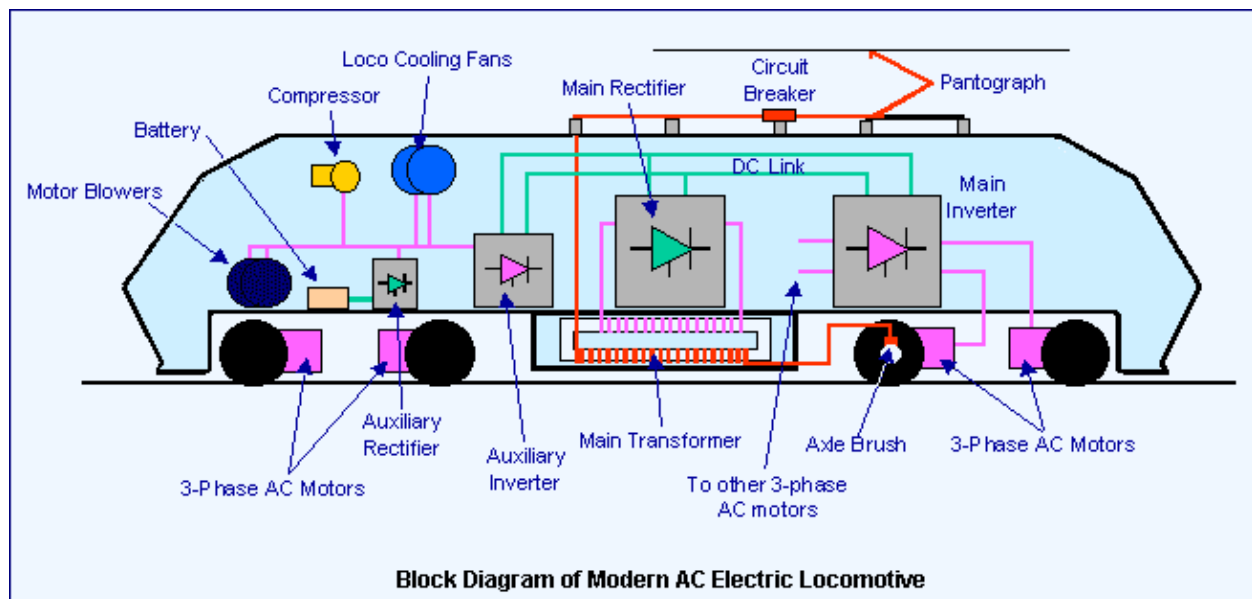
⁶ Francisco José Contreras Martínez. (2017). El transporte ferroviario como elemento básico de la política de transportes y sus efectos sobre la cohesión y la política regional de la Unión Europea. España: Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales.Uned.

Ferrocarriles Eléctricos

Los esfuerzos para propulsar vehículos ferroviarios con baterías datan de 1835, pero la primera aplicación exitosa de la tracción eléctrica fue en 1879, cuando una locomotora eléctrica estuvo en funcionamiento en una exhibición en Berlín. Las primeras aplicaciones comerciales de tracción eléctrica fueron para ferrocarriles suburbanos o metropolitanos. Uno de los primeros se produjo en 1895, cuando Baltimore y Ohio electrificaron un tramo de vía en Baltimore para evitar problemas de humo y ruido en un túnel. Uno de los primeros países en utilizar la tracción eléctrica para las operaciones de la línea principal fue Italia, donde se inauguró un sistema ya en 1902.⁷

Una "locomotora eléctrica" es un vehículo ferroviario que puede moverse sobre rieles y empujar o tirar de un tren conectado a él utilizando energía eléctrica extraída de una fuente externa, generalmente de cables aéreos o un tercer riel.

Las locomotoras eléctricas no tienen un "motor" convencional como hemos visto en una locomotora diésel, sino que usan la electricidad recolectada de la fuente externa para impulsar los motores de tracción que hacen girar las ruedas.



⁷ Allen, G. Freeman and Shedd, . Thomas Clark (2021, December 17). *locomotive*. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/technology/locomotive-vehicle>

Imagen de: <https://studyelectrical.com/2014/05/how-electric-locomotives-work.html>

Tipos de locomotoras eléctricas

Las locomotoras eléctricas son de tres tipos, las que pueden trabajar sobre

CC (corriente continua),

AC (Corriente Alterna) o

en ambos (AC/DC – Bi-corriente).

Las locomotoras eléctricas, aunque tienen un alto nivel de ingeniería eléctrica, funcionan según el principio único de extraer corriente de fuentes externas y luego, después de "modificarla" lo suficiente, alimentarla a los motores de tracción.

El proceso de "modificar" la corriente bruta extraída del exterior en energía de "uso" incluye un proceso complicado de conversión, reconversión, suavizado y transformación de la corriente a diferentes valores de frecuencia, voltaje, corriente, etc.

Funcionamiento de la locomotora eléctrica de CC

En las locomotoras de CC, la velocidad de los motores de tracción de CC se controla conectando todos los motores de tracción en serie durante el período de arranque e introduciendo resistencias de arranque.⁸

Estas resistencias de arranque se eliminan gradualmente del circuito y el voltaje en los motores de tracción aumenta gradualmente.

A esto le sigue el cambio de combinaciones de motores de serie a serie en paralelo y, finalmente, todos los motores se conectan en paralelo para que la locomotora pueda arrastrar el tren a la velocidad máxima permitida.

La tracción eléctrica generalmente se considera el medio más económico y eficiente de operar un ferrocarril, siempre que se disponga de electricidad barata y que la densidad del tráfico justifique el alto costo de capital. Al ser simplemente dispositivos de conversión

⁸ S. Hillmansen and C. Roberts, "Energy storage devices in hybrid railway vehicles: A kinematic analysis," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, vol. 221, pp. 135-143,

de energía, en lugar de dispositivos de generación de energía, las locomotoras eléctricas tienen varias ventajas. Pueden recurrir a los recursos de la planta de energía central para desarrollar una potencia muy por encima de sus valores nominales para arrancar un tren pesado o para superar una pendiente pronunciada a alta velocidad.⁹

Además, las locomotoras eléctricas son más silenciosas que otros tipos y no producen humo ni vapores. Las locomotoras eléctricas requieren poco tiempo en el taller para su mantenimiento, sus costos de mantenimiento son bajos y tienen una vida más larga que los ferrocarriles de diésel.

Las locomotoras eléctricas tienen el gran inconveniente de ser totalmente dependientes de la potencia que debe suministrarse para su funcionamiento.

Cualquier corte de energía, cortocircuito o rotura de Overhead Equipment (OHE) hará que los trenes se detengan. Por lo tanto, incluso en rutas totalmente electrificadas, las locomotoras diésel se mantienen siempre en modo de espera. Y en rutas parcialmente electrificadas, los trenes funcionan con diésel bajo el cable porque es más eficiente que cambiar de locomotora.

Energía Solar

Un tren solar es un tren eléctrico que obtiene la energía necesaria para su movimiento de células fotovoltaicas ubicadas sobre su techo o junto a la vía. El tren cuenta con paneles solares curvos y personalizados que alimentan un sistema de almacenamiento de baterías de 77 kilovatios-hora (kWh), capaz de proporcionar espacio de almacenamiento para una quincena de viajes. Las baterías de iones de litio cargadas con energía solar están diseñadas para operar en la potencia de tracción, los circuitos de control, los compresores de aire y la iluminación. Dispone además de un motor de emergencia que puede funcionar con diésel para ocasiones de emergencia.¹⁰

⁹ (2018). How electric Locomotives work?., de StudyElectrical Sitio web: <https://studyelectrical.com/2014/05/how-electric-locomotives-work.html#:~:text=The%20electric%20locomotive%20draws%20power,Motors%20which%20drive%20the%20axles.>

¹⁰ Girish K G. (2019). Solar Train: Power on Wheels. ., de Department of Electronics & Communication, BIET, Davangere Sitio web: <https://innovate.mygov.in/wp-content/uploads/2018/09/mygov1535902505419392.pdf>

En condiciones normales, el tren se mueve gracias a la energía solar captada a través de paneles fotovoltaicos incorporados en la parte superior del convoy doble, así como baterías para funcionar íntegramente con energía solar, que pueden generar hasta 6,6 kW.

En la práctica, apenas existen proyectos de trenes solares en el mundo, debido a varias complicaciones técnicas que supone alimentar un objeto tan grande (aunque eficiente) con energía solar. Que por otro lado es perfecta para mover objetos pequeños, como contenedores que prensan la basura.

El primer tren 100% solar del mundo es un ferrocarril de más de 70 años usado como atracción turística en Nueva Gales del Sur, Australia. Rehabilitado en 2017, la empresa North Byron Resort le instaló paneles solares en su techo que suministran al tren 6,6 kW de potencia. Esta es suficiente como para que el tren recorra los 3 km que separan las estaciones de North Beach y Byron Beach a una velocidad ridículamente baja (18 km/h) ideal para el recreo.

También en 2017 y con un funcionamiento muy similar, la Organización de Ferrocarril para Alternativas de Combustibles presentó el primer tren local de la India alimentado con energía solar y la primera estación del país impulsada por esta energía en Guyahati. Hoy en día, la India tiene más de 250 trenes solares y varias granjas fotovoltaicas en distintos puntos del territorio para aliviar el peso en la cubierta de cada convoy. Una energía que también sirve para el óptimo funcionamiento de luces, ventiladores y sistema de visualización de información. Según la organización, la incorporación de estos trenes supone el ahorro de 21.000 litros de diésel y la reducción de 9 toneladas de CO2 por tren al año. ¹¹

¿Pueden impulsarse los trenes únicamente con energía solar?

¹¹ Shreyansh Kakadiya (2016) Solar Architect - Intelligent Recommendation Engine for Solar Energy Battery Use. Computer Engineering Dwarkadas J. Sanghvi College of Engineering, India.

Pese al bajo rozamiento con los raíles, un tren es un vehículo de grandes dimensiones. Significa que hace falta bastante energía para ponerlo en movimiento, y aunque la necesaria para mantenerlo en ese estado suele ser más baja (salvo en ascensos), sigue siendo una cantidad importante.

Un tren de pasajeros de alta velocidad puede consumir cerca de 0,03 kWh por plaza y kilómetro, lo que para un tren de 600 plazas supone un total de 18 kWh/km. Suponiendo una velocidad de 250 km/h, se recorren un kilómetro cada 14,4 segundos y por tanto se consumen cerca de 3,6 MW.

Suponiendo una generación de 200 W por metro cuadrado, haría falta instalar 18 000 m² de placas fotovoltaicas junto a la vía para imprimir el impulso suficiente como para que el total de la energía consumida por el tren fuese eléctrico. Desde el punto de vista técnico, no es un reto inabordable, pero el despliegue de dicha infraestructura y su aprovechamiento en un circuito que puede tener múltiples trenes en marcha hacen que por ahora los trenes estrictamente solares sean una simple teoría.¹²

Tren eólico

Actualmente existen dos conceptos principales de trenes de transmisión eléctricos para turbinas eólicas, los doblemente alimentados (Doubly-fed) y los de plena potencia (full converter). La diferencia principal entre ambos es el tipo y el tamaño del generador usado, así como la funcionalidad del convertidor. El concepto de Plena Potencia (Full

¹² M. Martínez Eukliadas. (2021). TRENES SOLARES: QUÉ SON Y CÓMO FUNCIONAN. ., de Tomorrow City Sitio web: <https://tomorrow.city/a/trenes-solares-que-son-y-como-funcionan>

Converter) puede ser a su vez dividido en tres tipos: Velocidad lenta (Low speed) también conocido como direct-drive, Velocidad media y Alta velocidad.¹³

El concepto de Plena Potencia (Full Converter) está incrementando su cuota de mercado

Mientras el mercado ha estado dominado en gran medida por el sistema doblemente alimentado, el concepto de plena potencia está ganando rápidamente cuota de mercado. Existen diversos factores que influyen en ello como por ejemplo el cumplimiento de los requerimientos de código de red así como la optimización de generación de potencia a menores velocidades de viento.

Doblemente alimentado

Este concepto utiliza un generador asíncrono con rotor bobinado, donde los bobinados del rotor están conectados a un pequeño convertidor usando una unidad de anillos y escobillas. El generador aporta dos tercios de la potencia nominal directamente desde el estator y una tercera parte desde el rotor. El convertidor se usa para controlar la velocidad y el factor de potencia del generador, permitiendo un mayor rango de velocidad para la producción de potencia, así como la habilidad de producir potencia reactiva para dar soporte a la red. Un pequeño convertidor parcial dimensionado a un tercio de la potencia nominal puede ser usado ya que permite un rango de velocidad de aproximadamente +/- 30% de la velocidad nominal, la cual es suficiente para la aplicación eólica.¹⁴

Convertidor de Plena potencia

En el concepto de convertidor de plena potencia, el convertidor desacopla el generador y tren de transmisión mecánico de la red. Toda la potencia generada fluye a través del

¹³ Roger Andrews. (2017). Do the Netherlands' trains really run on 100% wind power?. ., de EUAmearns Sitio web: <http://euanmearns.com/do-the-netherlands-trains-really-run-on-100-wind-power/>

¹⁴ Conceptos de tren de transmisión eléctrico para Turbinas Eólicas
<https://new.abb.com/power-converters-inverters/es/convertidores-eolicos/convertidores-eolicos-industriales/conceptos-de-tren-de-transmision-electrico-para-turbinas-eolicas>

convertidor a la red. Generadores síncronos (de Imanes Permanentes) y generadores asíncronos son los típicamente usados. El convertidor proporciona el par y controla la velocidad del generador.

Existen tres conceptos principales de convertidores de plena potencia: de alta, media y baja velocidad, usando, cada una de ellas, distintas soluciones de generador y de multiplicadora.

Ventajas en comparación con el concepto Doblemente alimentado

- Desacopla el generador de la red.
- Reduce impactos mecánicos en la turbina producidos por las desconexiones de la red durante los huecos.
- Incrementado cumplimiento del código de red.
- Permite pleno rango de velocidad.
- Incrementa la producción anual de energía.
- Producción de potencia reactiva total
- Control total de la potencia.

Conceptos principales de convertidores de plena potencia

1) Concepto de Convertidor de Plena Potencia a alta velocidad

El concepto de convertidor de plena potencia a alta velocidad (HSFC – High-speed full Converter) es mecánicamente similar al concepto de convertidor doblemente alimentado, usando una multiplicadora común de tres etapas y un pequeño generador de imanes permanentes (de hasta 2000 rpm). También pueden usarse Generadores Asíncronos.

Ventajas:

- Menor tamaño y peso del generador
- Puede usarse para actualizar los diseños doblemente alimentados ya existentes.

2) Concepto de Convertidor de Plena Potencia a velocidad media

Con el concepto de Convertidor de plena potencia a velocidad media (MSFC –

Medium-speed full converter), se usan tanto multiplicadoras de una como de dos etapas junto con un generador compacto de imanes permanentes de media velocidad (de hasta 500 rpm).

Ventajas:

- Menor velocidad reduciendo el stress mecánico
- Menor peso y tamaño

3) Concepto de Convertidor Plena potencia a baja velocidad.

El concepto de Convertidor de plena potencia a baja velocidad (LSFC – Low Speed Full Converter utiliza un generador de mayor diámetro a baja velocidad (hasta 30 rpm).

Generadores de Imanes Permanentes y generadores síncronos de excitación separada son los típicamente usados por este concepto.

Ventajas:

- No usa multiplicadora

Tren levitación magnética

Es un sistema de transporte en el cual se incluye la suspensión, guía y propulsión de vehículos mediante el uso de un importante número de imanes para la sustentación y la propulsión con la levitación magnética. La principal ventaja de este tipo de métodos es que es mucho más rápido, suave y silencioso que cualquier otro tipo de sistema de transporte público convencional., además al evitar el roce y fricción de los elementos tanto la velocidad como el uso de energía es mucho más aprovechable. Su potencial supera los 6440 km/h si es realizado en un túnel al vacío. ¹⁵

Desde luego que si no se hace uso de un túnel al vacío la mayor parte del consumo de la energía es empleado para superar la resistencia del aire, como sucede con cualquier

¹⁵ Fröidh, O. (2003). Introduction of regional high speed trains: A study of the effects of Svealand line on the travel market, travel behavior and accessibility. Stockholm: KTH.

otro tipo de recorrido en AVE. Precisamente sobre el tren de alta velocidad en el cual se ha utilizado el sistema de levitación magnética, la velocidad que sea sostenido hasta ahora es de 603 km/h en la ruta Yamanashi el 21 de abril de 2015.

¿Cómo funciona el tren de levitación magnética?

El tren de levitación magnética sea tan rápido es que en este sistema la ausencia de contacto entre el carril y el tren hace que la única fricción sea con el aire, y esta fricción es reducida al mínimo por su forma aerodinámica. Estos trenes de tipo maglev están diseñados para viajar a velocidades muy altas, con un importante consumo de energía para mantener y controlar la polaridad de los imanes y con un nivel muy bajo de ruido, en el cual estos trenes pudieran alcanzar hasta una velocidad de 650 km/h. Estas velocidades impresionantes hacen que estos trenes puedan llegar a convertirse en competidores directos del sistema de transporte aéreo.

Si bien existe potencial para propulsar trenes con hidrógeno utilizando un motor de combustión convertido, la tecnología actual se centra en el uso de celdas de combustible de hidrógeno, que generan electricidad mediante una reacción química entre dos electrodos; un ánodo negativo y un cátodo positivo.

El hidrógeno actúa como combustible en la celda con la adición de oxígeno, generando energía eléctrica con agua como único subproducto. El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo y se puede separar del agua de mar. La técnica utilizada para obtener el hidrógeno tiene un impacto en cuán ecológico es el hidrógeno. La reforma con vapor, por ejemplo, utiliza combustibles fósiles nocivos, mientras que la electrólisis que utiliza electricidad de energía renovable o el exceso de energía de la red no genera emisiones de carbono. Las propuestas para hydrail incluyen la producción de combustible de hidrógeno en depósitos de mantenimiento individuales, que luego se pueden bombear a tanques presurizados en los vehículos.

Los avances en la tecnología de celdas de combustible han mejorado la viabilidad de los vehículos impulsados por hidrógeno, con la reducción del peso de las celdas de combustible y la mejora de la eficiencia. Las celdas de combustible convierten la energía química dentro del hidrógeno en electricidad, creando también agua y calor. Este es el inverso del proceso de electrólisis que se puede usar para crear combustible de

hidrógeno, aunque hay pérdidas de energía involucradas en estos procesos, con informes que dicen que la eficiencia de convertir electricidad en hidrógeno y viceversa está justo por debajo del 30%, que es aproximadamente equivalente a los motores diésel, pero menos que con tracción eléctrica mediante cables aéreos. La electricidad producida por las celdas de combustible se alimenta a un motor para impulsar el tren.¹⁶

A diferencia del gas natural o el combustible diesel, el hidrógeno producido por electrólisis produce cero emisiones, mientras que el hidrógeno producido por reformado de metano con vapor todavía produce emisiones un 45% más bajas que los trenes diesel.

Sin embargo, para que la industria ferroviaria avance hacia soluciones hidráulicas, será necesario invertir en la red de producción y distribución de hidrógeno.

Y aunque las bondades están a la vista, uno de sus principales inconvenientes está relacionado con el alto costo de las líneas, lo cual ha hecho que se limite su uso comercial. El alto costo se debe a una serie de factores importantes entre los cuales pudiéramos destacar el altísimo costo de la infraestructura necesaria para la vida y el sistema eléctrico y otro inconveniente que también es relevante es el alto consumo energético. Sin embargo, varios países debido a los beneficios que ofrece tener este tipo de transporte están implementando este sistema en sus vidas, tal es el caso de China y Japón.¹⁷

El tren maglev cuenta con tres componentes que son básicas: por un lado, tenemos una fuente de poder eléctrico de gran tamaño, espirales de metal alineando las vías y magnetos debajo del tren. Una de las principales diferencias de este tipo de tren en relación con un tren común es que no tiene motor y básicamente la energía que utiliza este tipo de tren es la electricidad en los espirales de metal lo que en sí crea una especie de campo magnético para mover el tren.

Lo que consigue con este campo magnético es repeler los magnetos debajo del tren y con esto se hace posible que el tren levite de 1 a 10 centímetros. Esta impresionante

¹⁶ Chen, L., & Hall, P. (2012). The wider spatial-economic impacts of high-speed trains: a comparative case study of Manchester and Lille sub-regions. *Journal of Transport Geography* ,

¹⁷ Takatsu, T. (2007, 8). The history and future of high-speed rail in Japan. *Japan Railway & Transport Review* 48

corriente eléctrica cambia la polaridad de los espirales magnetizados constantemente, lo que genera que el campo magnético empuja el tren hacia adelante.

Implementación del tren magnético en distintos países

En varios países se están desarrollando este tipo de trenes con el fin de mejorar su sistema ferroviario y hacerlo aún más moderno y rápido. Alemania y Japón están desarrollando trenes maglev, pero con diferentes métodos.

Tren magnético en Alemania

En el caso de Alemania, denominado Transrapid, tiene una formación distinta ya que en su desarrollo que utiliza una tecnología donde el fondo del tren envuelve las vías de metal. En este caso los electromagnetos se encuentran encima de las vías por debajo del tren, lo que permite que el vagón levite 1 centímetro incluso si el vagón está sin movimiento.

Tren magnético en Japón

Japón por otro lado, ha desarrollado un sistema de suspensión electrodinámica que va más hacia el origen del concepto ya que está basado en la fuerza repulsiva de los magnetos. En este caso se hace uso de magnetos superconductores, y estos emiten electricidad aún si la fuente de energía eléctrica se ha apagado. Esto lo logran congelando los espirales de metal a temperaturas extremadamente bajas para ahorrar energía. Este sistema criogénico comercialmente podríamos decir que no es muy conveniente por su precio elevado, pero en Japón esto no es un inconveniente.

Tren magnético en Shanghai (China)

Sin embargo, el único país que cuenta con un tren maglev totalmente comercial está en Shanghai (China) y en su construcción se basó en el sistema creado por Alemania. Si bien es cierto que existen muchos países que tienen este proyecto en mente, la construcción de muchos de estos se ha visto limitado por los costos. Estados Unidos es

uno de esos países que tiene proyectarlo realizarlo futuro, por lo que es cuestión de tiempo que este tipo de tecnología lo podamos ver también en ese país.¹⁸

Tren de hidrógeno

Si bien existe potencial para propulsar trenes con hidrógeno utilizando un motor de combustión convertido, la tecnología actual se centra en el uso de celdas de combustible de hidrógeno, que generan electricidad mediante una reacción química entre dos electrodos; un ánodo negativo y un cátodo positivo.

El hidrógeno actúa como combustible en la celda con la adición de oxígeno, generando energía eléctrica con agua como único subproducto. El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo y se puede separar del agua de mar. La técnica utilizada para obtener el hidrógeno tiene un impacto en cuán ecológico es el hidrógeno. La reforma con vapor, por ejemplo, utiliza combustibles fósiles nocivos, mientras que la electrólisis que utiliza electricidad de energía renovable o el exceso de energía de la red no genera emisiones de carbono. Las propuestas para hydrail incluyen la producción de combustible de hidrógeno en depósitos de mantenimiento individuales, que luego se pueden bombear a tanques presurizados en los vehículos.¹⁹

Los avances en la tecnología de celdas de combustible han mejorado la viabilidad de los vehículos impulsados por hidrógeno, con la reducción del peso de las celdas de combustible y la mejora de la eficiencia. Las celdas de combustible convierten la energía química dentro del hidrógeno en electricidad, creando también agua y calor. Este es el inverso del proceso de electrólisis que se puede usar para crear combustible de hidrógeno, aunque hay pérdidas de energía involucradas en estos procesos, con informes que dicen que la eficiencia de convertir electricidad en hidrógeno y viceversa

¹⁸ <https://www.truecalia.com/blog/funciona-tren-levitacion-magnetica/>

¹⁹ <https://www.ballard.com/markets/rail>

está justo por debajo del 30%, que es aproximadamente equivalente. a los motores diésel, pero menos que con tracción eléctrica mediante cables aéreos. La electricidad producida por las celdas de combustible se alimenta a un motor para impulsar el tren.²⁰

A diferencia del gas natural o el combustible diésel, el hidrógeno producido por electrólisis produce cero emisiones, mientras que el hidrógeno producido por reformado de metano con vapor todavía produce emisiones un 45% más bajas que los trenes diésel.

Sin embargo, para que la industria ferroviaria avance hacia soluciones hidráulicas, será necesario invertir en la red de producción y distribución de hidrógeno.

¿Por qué hidrógeno?

El uso de hidrógeno y, en particular, el hidrógeno verde como combustible ferroviario ofrece una variedad de beneficios, incluido el apoyo a los objetivos de cero carbonos como fuente de energía limpia y ofrece una producción de energía más potente y eficiente que con los combustibles fósiles.²¹

El hidrógeno puede transportarse a bordo de los trenes y usarse en líneas que no justifican el costo de la electrificación debido a la baja frecuencia de los servicios, como los servicios de trenes rurales que actualmente dependen del diésel.

Las compañías ferroviarias también han explorado la energía de las baterías, pero actualmente no pueden almacenar suficiente electricidad para hacer funcionar un tren y, por lo tanto, solo se usan realmente como una fuente de alimentación de respaldo híbrida para algunas aplicaciones.

Los trenes propulsados por hidrógeno pueden alcanzar velocidades de hasta 140 km/h y recorrer distancias de hasta 1000 km sin repostar, diez veces más que los trenes

²⁰ https://www.cms-lawnow.com/ealerts/2021/08/reimagining-transport-hydrogen-trains?cc_lang=en

²¹ <https://www.ballard.com/markets/rail>

eléctricos alimentados por batería. El reabastecimiento de combustible también es rápido en menos de 20 minutos.

Los trenes de hidrógeno son seguros, como lo demuestran las investigaciones sobre la seguridad de los automóviles impulsados por hidrógeno, y los expertos afirman que los vehículos con celdas de combustible de hidrógeno son más seguros que los que tienen motores de combustión interna.

El hidrógeno es altamente combustible cuando se mezcla con aire, lo que genera algunas preocupaciones sobre la seguridad del combustible. Sin embargo, dado que el hidrógeno es más liviano que el aire, el combustible se ventilaría rápidamente a la atmósfera en lugar de encenderse si se perfora un tanque de almacenamiento. Esto ha llevado a los expertos a creer que el combustible de hidrógeno es menos peligroso que los motores de combustión.

A medida que la tecnología sigue mejorando, parece que los trenes de hidrógeno (a menudo híbridos con asistencia de batería) formarán parte de una red ferroviaria más amplia que seguirá utilizando líneas electrificadas en rutas más transitadas, al menos a corto plazo.

Independientemente, la tecnología de los trenes de hidrógeno podría ser una parte importante de una red de transporte más amplia, incluidos los tranvías y otros viajes locales, los trenes de pasajeros, el transporte de mercancías y los ferrocarriles industriales.

Cuadro comparativo de la evolución de las energías utilizadas en Ferrocarriles

Energía usada en el Ferrocarril	Ventajas	Desventajas
Vapor	<ul style="list-style-type: none">- Carbón es de bajo costo- No necesita grandes construcciones adicionales.- Costo de generación es bajo.	<ul style="list-style-type: none">-Contaminación del aire al quemar el carbón, esto genera emisiones de CO2.-La minería del carbón crea gas metano, y toda la contaminación se filtra en el agua y la tierra.

		<ul style="list-style-type: none"> -Cuesta más mover el tren por la mano de obra que se necesita que otras formas de energía. -Es más pesado que los demás ferrocarriles. -Tiene una eficiencia menor. - Al ser pesado, daña rápidamente las vías.
Diesel	<ul style="list-style-type: none"> -No requiere cadena de suministro de agua y carbón. -Es más "limpio" que el ferrocarril de vapor. - Bajo costo de inicio ya que no se requiere electrificación. -No interfiere con alguna línea de telecomunicación. - El control de la velocidad es fácil. -Se necesita menor combustible que una locomotora de vapor, por su eficiencia térmica que es 4 veces mayor. - Acelera el tren más rápido y opera con velocidades constantes dañando menos las vías. 	<ul style="list-style-type: none"> -La vida útil de un tren que se mueve con diésel es baja. - Tiene un complejo diseño de motor por lo que hace que el costo de mantenimiento sea alto. - El motor diésel no tiene un par de arranque alto
Eléctrico	<ul style="list-style-type: none"> -Considerado el más económico y eficiente en la operación de trenes -En operación, la cantidad de ruido causado es significativamente menor que el ferrocarril de diésel y aún más con el de vapor. -No genera humo o vapor en operación. -El costo de mantenimiento es bajo, igual que su tiempo en el taller. - Tiene una vida útil mayor que la del ferrocarril con diésel. 	<ul style="list-style-type: none"> -La alta inversión de capital para instalar las líneas y el costo de mantenimiento de la planta (estructuras y subestaciones eléctricas). -Los costos cambian, ya que normalmente se requieren en los sistemas de señalización para inmunizar sus circuitos contra la interferencia de los altos voltajes de corriente de tracción y para adaptar su desempeño a la aceleración superior y las velocidades sostenidas que se obtienen de la tracción eléctrica.
Solar	<ul style="list-style-type: none"> -La energía utilizada es "más limpia" que todas las energías mencionadas anteriormente. 	<ul style="list-style-type: none"> -El espacio para los paneles solares necesarios para conseguir la energía para mover el tren es enorme.

	<ul style="list-style-type: none"> -Con batería llena, se puede usar el tren 2 días seguidos. -No hace emisiones de carbono. - No se necesita construir un ferrocarril nuevo para poder implementar la energía eólica, se puede modificar cualquier ferrocarril existente. 	<ul style="list-style-type: none"> -Los paneles solares tienen una eficiencia baja, y se tiene que esperar a que la tecnología avance para aumentarla. -El costo de inversión inicial es alto.
Eólica	<ul style="list-style-type: none"> -Es una energía sustentable. -Es la energía más barata que hay ya en operación. -Tiene un bajo costo de mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> -Los aerogeneradores ocupan bastante espacio e impactan en la fauna del lugar. - Las turbinas del aerogenerador pueden causar ruido. -Se necesitan mantenimiento constante. -No se está produciendo 24/7 esta energía porque dependen del clima .
Levitación Magnética	<ul style="list-style-type: none"> -Extremadamente rápido, alcanzando velocidades de hasta 500 km/hr. -Una operación sin ruido, una persona no alcanza a escucharlo. -Utiliza 30% menos energía que los ferrocarriles eléctricos. -El costo de mantenimiento es bajo ya que existe una falta de contacto entre el tren y las vías. 	<ul style="list-style-type: none"> -Las vías son más caras que las vías de cualquier otro ferrocarril. -Las vías no son compatible con las de otros trenes, entonces se tiene que reconstruir toda la ruta
Hidrógeno	<ul style="list-style-type: none"> -La tecnología crea menos contaminación ambiental que cualquier otra energía. -Reduce la dependencia con fossil fuels. -Es bastante segura de utilizar. -Disminuye por completo el ruido en operación. -Reduce las vibraciones creadas por el ferrocarril. 	<ul style="list-style-type: none"> -La tecnología está comenzando y la eficiencia es relativamente baja comparada con otras energías. -El costo inicial del proyecto es alto. -Actualmente no puede llegar a altas velocidades.

Conclusiones

Gracias a la ciencia y a la importancia del ferrocarril en el mundo como transporte de carga y de pasajeros se ha logrado mantener cómo una opción de inversión y crecimiento

económico. Lo cuál causó que inevitablemente se siga la investigación de mejorar la eficiencia del ferrocarril y con esto encontrar la energía óptima. Al término de esta investigación podemos concluir diferentes cosas:

- El desarrollo tecnológico a partir de la invención de la máquina de vapor ha sido enorme, se han creado máquinas capaces de transportar toneladas de carga por todo el país con eficiencias jamás imaginadas. Todas las nuevas energías usadas actualmente están mirando hacia la sustentabilidad, rendimiento y el rompimiento con las energías fósiles.
- Las concesionarias en México han relevado el estudio e implementación de nuevas formas de energías, esto ha causado un retraso en tecnología y un declive de eficiencia comparándolo con países desarrollados. Analizando la información obtenida la energía más práctica que no tiene el país es el hidrógeno, ya que en este el costo de inversión inicial es alto pero sus ventajas son tantas que podrán ayudar a un más al desarrollo y medio ambiente de México. Reducción del ruido a casi inexistente, energía sustentable y renovable y por último eficiencia del transporte de carga y pasajeros con mayores velocidades y con menos riesgos que la máquina con combustión interna. Por el momento sólo Alemania y Japón tienen esta tecnología y si es obtenida por el gobierno mexicano a tan temprana edad de la tecnología se podría aprender el know how de la energía y ser pioneros en el mundo.
- Es un deber de los países y de las empresas ferroviarias incentivar a investigar las energías más apropiadas que se alineen a las necesidades económicas, sociales y ambientales, esto causará un aumento en el crecimiento económico porque generará empleos, se aumentará la eficiencia de los ferrocarriles y causará que el servicio ferroviario tenga un costo bajo, las empresas podrán dar un mejor precio a los productos ya que el transporte de la mercancía bajará el costo, se acercará el país a los objetivos de sustentabilidad 2030 de cero emisiones de carbono, el turismo aumentará por la infraestructura y la facilidad de trasladarse

por el país y por último la población tendrán un medio de transporte que puede llegar a satisfacer la demanda.

Bibliografía y Mesografía

1. R. Sims, R. Schaeffer, and F. Creutzig, "Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change," IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press 2014.
2. UIC and CER, "Moving towards sustainable mobility: A strategy for 2030 and beyond for the european railway sector," UIC Communications Department 2012
3. Essay Examples. (February 2019). The Steam Engine Essay. Retrieved from <https://benjaminbarber.org/the-steam-engine-essay/>
4. Railway Museum. (2022). What Makes A Steam Locomotive Work?. ., de Mid-Continent Railway Museum Sitio web: <https://www.midcontinent.org/kids-page/what-makes-a-steam-locomotive-work/#:~:text=When%20heated%2C%20water%20turns%20to,wheels%20that%20operate%20the%20locomotive.>
5. Shedd, T. Clark and Allen, . Geoffrey Freeman (2021, December 17). *locomotive. Encyclopedia Britannica.* <https://www.britannica.com/technology/locomotive-vehicle>
6. Francisco José Contreras Martínez. (2017). El transporte ferroviario como elemento básico de la política de transportes y sus efectos sobre la cohesión y la política regional de la Unión Europea. España: Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales.Uned.
7. Allen, G. Freeman and Shedd, . Thomas Clark (2021, December 17). *locomotive. Encyclopedia Britannica.* <https://www.britannica.com/technology/locomotive-vehicle>

8. S. Hillmansen and C. Roberts, "Energy storage devices in hybrid railway vehicles: A kinematic analysis," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, vol. 221, pp. 135-143,
9. (2018). How electric Locomotives work?., de StudyElectrical Sitio web: <https://studyelectrical.com/2014/05/how-electric-locomotives-work.html#:~:text=The%20electric%20locomotive%20draws%20power,Motors%20which%20drive%20the%20axles.>
10. Girish K G. (2019). Solar Train: Power on Wheels. ., de Department of Electronics & Communication, BIET, Davangere Sitio web: <https://innovate.mygov.in/wp-content/uploads/2018/09/mygov1535902505419392.pdf>
11. Shreyansh Kakadiya (2016) Solar Architect - Intelligent Recommendation Engine for Solar Energy Battery Use. Computer Engineering Dwarkadas J. Sanghvi College of Engineering, India.
12. M. Martínez Eukliadas. (2021). TRENES SOLARES: QUÉ SON Y CÓMO FUNCIONAN. ., de Tomorrow City Sitio web: <https://tomorrow.city/a/trenes-solares-que-son-y-como-funcionan>
13. Roger Andrews. (2017). Do the Netherlands' trains really run on 100% wind power?. ., de EUAmearns Sitio web: <http://euanmearns.com/do-the-netherlands-trains-really-run-on-100-wind-power/>
14. Conceptos de tren de transmisión eléctrico para Turbinas Eólicas <https://new.abb.com/power-converters-inverters/es/convertidores-eolicos/convertidores-eolicos-industriales/conceptos-de-tren-de-transmision-electrico-para-turbinas-eolicas>
15. Fröidh, O. (2003). Introduction of regional high speed trains: A study of the effects of Svealand line on the travel market, travel behavior and accessibility. Stockholm: KTH.
16. Chen, L., & Hall, P. (2012). The wider spatial-economic impacts of high-speed trains: a comparative case study of Manchester and Lille sub-regions. Journal of Transport Geography ,
17. Takatsu, T. (2007, 8). The history and future of high-speed rail in Japan. Japan Railway & Transport Review 48

18. <https://www.truecalia.com/blog/funciona-tren-levitacion-magnetica/>
19. <https://www.ballard.com/markets/rail>
20. https://www.cms-lawnow.com/ealerts/2021/08/reimagining-transport-hydrogen-trains?cc_lang=en
21. Karim Nice & Talon Homer "How Diesel Locomotives Work" 22 May 2001. HowStuffWorks.com. <<https://science.howstuffworks.com/transport/engines-equipment/diesel-locomotive.htm>>