KAANBAL

PROGRAMA DE TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTO

TREN MAYA

TSÍIMIN K'ÁAK

Lección 1

Lección 1

CURSO 8
Sistemas electromecánicos

con Ramiro Pérez López

TREN MAYA
TSÍIMIN K'ÁAK

ÍNDICE
DE IMÁGENES

Imagen 1: Locomotora a Diesel. 5

Imagen 2: Vagones de carga. 6

Imagen 3: Shinkansen, comúnmente llamado "Tren bala" 7

Imagen 4: Tren Maya: Conectará varias ciudades y poblados 7

Imagen 5: AMTRAK Surfliner del Pacífico 8

Imagen 6: Contenedores varios transportando mercancía. 9

Imagen 7: Vagones cisterna marca Nymwag. 10

Imagen 8: Vagones frigoríficos de la marca Thermo King. 10

Imagen 9: Vagones contenedores. 11

Imagen 10: Locomotora Eléctrica. 13

Imagen 11: Sistema de catenaria para la alimentación de trenes eléctricos. 13

Imagen 12: Pantógrafo ferroviario. 14

Imagen 13: Alimentación de una subestación de tracción al sistema de catenaria. 14

Imagen 14: Locomotora a Diesel. 16

Imagen 15: Tren Maya contará con 32 vagones duales 17

Imagen 16: Lado Izq. tren a Diesel, Lado Der. tren eléctrico. 21

Imagen 17: Central de ciclo combinado de la CFE en Samalayuca, México. 23

Imagen 18: Central Hidroeléctrica "El Cajón", Nayarit, México. 23

Imagen 19: Parque de energía eólica, en el estado de Oaxaca. 24

Imagen 20: Motor de locomotora a Diesel 24

Imagen 21: Parque Eólico y granja solar. 25

Imagen 22: Tren suburbano CDMX. 26

Imagen 23: Locomotora eléctrica PRR DD1 27

Imagen 24: Motor de tracción. 28

Imagen 25: Convertidor de tracción eléctrica. 28

Imagen 26: Baterías de locomotora híbrida. 29

Imagen 27: Sistema de control de tracción. 29

Imagen 28: Mantenimiento de un motor de tracción. 30

Imagen 29: Freno mecánico. 31

Imagen 30: Freno regenerativo. 32

Imagen 31: Freno neumático. 33

Lección 1

SISTEMAS FERROVIARIOS

El desarrollo de sistemas ferroviarios modernos representa una oportunidad crucial para fomentar el transporte sostenible, eficiente y accesible en América Latina. En este contexto, el Tren Maya surge como un proyecto emblemático en México que busca integrar la movilidad ferroviaria con el desarrollo económico, social y turístico de la región sureste del país. Este curso proporcionará una visión integral de los aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales relacionados con los sistemas ferroviarios, utilizando el Tren Maya como caso de estudio principal. Los participantes adquirirán conocimientos clave sobre planificación, diseño, implementación y operación de proyectos ferroviarios, con un enfoque en el impacto y las lecciones aprendidas de este proyecto único.

Introducción a los Ferrocarriles

La historia del ferrocarril se remonta al siglo XIX, marcando un antes y un después en el transporte de mercancías y pasajeros. En México, la primera línea ferroviaria que conectó Veracruz con la Ciudad de México fue clave para impulsar el comercio y desarrollar la economía regional. Por ejemplo, permitió reducir significativamente los tiempos de transporte de productos agrícolas y manufacturados, fortaleciendo el mercado interno. A lo largo de los años, los trenes han evolucionado hacia tecnologías más modernas, como las locomotoras eléctricas, que ofrecen mayor eficiencia y menor impacto ambiental.

La Historia del Ferrocarril: De su Origen Global a su Impacto en México.

Los trenes han sido una de las invenciones más importantes en la historia del transporte, marcando un antes y un después en la movilidad de personas y mercancías. Su origen se remonta a principios del siglo XIX, cuando se comenzaron a utilizar locomotoras a vapor en Gran Bretaña, impulsadas por la necesidad de un medio más eficiente para transportar carbón y otros productos. La primera línea ferroviaria moderna, la Stockton and Darlington Railway (1825), fue un hito, y su éxito rápidamente se replicó en toda Europa y América. En México, el ferrocarril comenzó a tener un impacto significativo a finales del siglo XIX, cuando la primera línea ferroviaria, que unía Veracruz con México, comenzó a operar en 1850. Este avance facilitó el comercio y la conectividad entre regiones distantes del país, impulsando el crecimiento económico y el desarrollo de la infraestructura. Con el tiempo, los trenes evolucionaron, adoptando nuevas tecnologías como la electricidad y el diésel, lo que ha permitido su expansión y modernización hasta convertirse en un medio de transporte fundamental en la actualidad.

Definición de trenes: Función en el transporte de personas y mercancías.

Los trenes son sistemas de transporte que operan sobre rieles y se utilizan para el desplazamiento de personas y mercancías. Siguen siendo una pieza clave en el desarrollo de la infraestructura de transporte de muchos países. Su función principal en el transporte de pasajeros radica en ofrecer una opción eficiente, rápida y cómoda, conectando ciudades y regiones. Los trenes permiten a los viajeros disfrutar de un recorrido relajado, con la posibilidad de desplazarse sin las preocupaciones del tráfico y con un menor impacto ambiental. Además, ofrecen una experiencia de viaje, donde los pasajeros pueden interactuar y disfrutar del paisaje. En cuanto al transporte de mercancías, los trenes son fundamentales para mover grandes volúmenes de productos a largas distancias, lo que contribuye a la economía y a la logística de distribución. Gracias a su capacidad para transportar carga pesada y su menor impacto ambiental en comparación con otros medios de transporte, los trenes se han convertido en una opción clave en la infraestructura de transporte moderna.

¿Qué es un tren?

Un tren es un conjunto de vehículos que circulan sobre raíles instalados en vías férreas. Los trenes son impulsados principalmente por locomotoras que, en su mayoría, funcionan con motores diésel o eléctricos. Los vagones de diferentes tipos (de pasajeros, de carga, o mixtos), son remolcados por las locomotoras o, en algunos casos, tienen sus propios motores.

La estructura básica de un tren incluye:

- **Locomotora:** Es el vehículo que proporciona la energía de tracción, moviendo el tren hacia adelante.

Imagen 1: Locomotora a Diesel.

Fuente: New York Blower Company. (n.d.). Locomotora Diésel. https://www.nyb.com/es/railroad-and-locomotive/

- **Vagones:** Son los compartimentos donde se transportan personas o mercancías. Pueden ser de pasajeros, carga, cisternas, entre otros.

Imagen 2: Vagones de carga.

Fuente: DoverMEI. (n.d.). Vagones para transporte de carga: 7 tipos de vagones y sus usos. https://dovermei.com/es/7-tipos-de-vagones-y-sus-usos/

Función en el transporte de personas

Los trenes de pasajeros son uno de los modos de transporte más eficientes para cubrir distancias medias y largas. Ofrecen comodidad, seguridad y capacidad para transportar a un gran número de personas en un solo viaje.

Tipos de trenes:

Existen diferentes tipos de trenes, cada uno adaptado a necesidades específicas. Los trenes nocturnos, por ejemplo, son populares en Europa y Asia para largas distancias; en México, aunque su uso es limitado, son considerados como una opción viable para el turismo regional. Por otro lado, los trenes suburbanos y regionales, como el Tren Suburbano de la CDMX, facilitan la movilidad diaria de miles de personas, reduciendo la congestión vehicular.

Dependiendo de su configuración y destino, los trenes de pasajeros se dividen en varios tipos:

- **Trenes de alta velocidad:** Son utilizados para transportar personas rápidamente entre grandes ciudades, cubriendo distancias considerables en poco tiempo. Estos trenes, como el AVE en España o el Shinkansen en Japón, son capaces de alcanzar velocidades superiores a los 300 km/h.

Imagen 3: Shinkansen, comúnmente llamado "Tren bala", es un ícono del diseño y las tecnologías japonesas.

Fuente: Japan House London. (n.d.). Shinkansen, "Tren bala". https://www.japanhouselondon.uk/read-and-watch/shinkansen/

- **Trenes regionales y suburbanos:** Los trenes regionales y suburbanos son sistemas de transporte ferroviario diseñados para conectar áreas urbanas con suburbios o regiones cercanas, facilitando la movilidad diaria de las personas. Los trenes suburbanos operan principalmente en áreas metropolitanas, realizando trayectos cortos y frecuentes entre la ciudad y sus alrededores, siendo ideales para desplazamientos diarios de los trabajadores y estudiantes. Por otro lado, los trenes regionales cubren distancias mayores entre ciudades o regiones cercanas, proporcionando una opción rápida y eficiente para viajes de mediana distancia. Ambos tipos de trenes son fundamentales para descongestionar las ciudades y ofrecer una alternativa sostenible al transporte por carretera.

Imagen 4: Tren Maya: Conectará varias ciudades y poblados a través de su recorrido por el sureste del país.

Fuente: Alstom. (n.d.). Proyecto del Tren Maya. https://www.alstom.com/es/proyecto-del-tren-maya

- **Trenes nocturnos o de largo recorrido:** Estos están diseñados para viajes de larga distancia, que pueden durar desde varias horas hasta incluso días. Estos trenes operan durante la noche, permitiendo a los pasajeros descansar mientras se trasladan de una ciudad a otra o entre países, combinando el transporte con el alojamiento. A menudo, cuentan con vagones-cama o asientos reclinables para mayor comodidad. Son una opción popular para quienes desean aprovechar el tiempo de viaje y evitar los costos de alojamiento, además de ofrecer una experiencia más relajada y panorámica que otros medios de transporte como los aviones. Estos trenes siguen siendo una opción clave en regiones de Europa, Asia y América Latina, donde las rutas ferroviarias de larga distancia están bien desarrolladas.

Imagen 5: AMTRAK Surfliner del Pacífico: Recorre 560 km a lo largo de la costa de California, E.U.A.

Fuente: Amtrak Pacific Surfliner. (n.d.). Surfliner del Pacífico horarios. https://www.pacificsurfliner.com/plan-your-trip/schedules/

Función en el transporte de mercancías

Desde sus inicios, los trenes han jugado un papel crucial en el transporte de mercancías, transformando la economía global. En el siglo XIX, con la Revolución Industrial, la demanda de transporte eficiente para materias primas y productos manufacturados creció significativamente. Las locomotoras a vapor permitieron trasladar grandes volúmenes de carbón, mineral, alimentos y otros productos a distancias mucho mayores y con mayor rapidez que los métodos tradicionales, como el transporte por barco o carreta. En países como Estados Unidos y Gran Bretaña, las redes ferroviarias se expandieron rápidamente, facilitando el comercio interno además de conectar mercados regionales y nacionales. En México, la introducción de los trenes en la segunda mitad del siglo XIX permitió el transporte más rápido de mercancías entre regiones clave como Veracruz y la Ciudad de México, contribuyendo al desarrollo económico del país.

Hoy en día, el transporte de mercancías por ferrocarril sigue siendo una opción clave para el comercio, especialmente para productos pesados y a granel, como minerales, productos agrícolas y productos manufacturados. Los trenes ofrecen una capacidad de carga mucho mayor que los camiones, lo que los convierte en una opción más eficiente y ecológica para trayectos largos. Con los avances tecnológicos, los trenes de mercancías han incorporado sistemas más avanzados como los contenedores estándar, lo que facilita la carga y descarga de productos en diferentes modos de transporte, desde el ferrocarril hasta el barco o el camión. A pesar de la competencia de otros modos de transporte, los trenes continúan siendo una parte esencial en las cadenas de suministro globales, contribuyendo a la reducción de la congestión vial y las emisiones de carbono.

Los trenes de carga están compuestos por una serie de vagones especializados para transportar diferentes tipos de mercancías:

- **Vagones de mercancías generales:** Utilizados para transportar productos no perecederos o materiales de construcción.

Imagen 6: Contenedores varios transportando mercancía.

Fuente: The Logistics World. (n.d.). Tipos de vagones ferroviarios: Especificaciones y beneficios para el transporte de cargas. https://thelogisticsworld.com/logistica-y-distribucion/tipos-de-vagones-ferroviarios-especificaciones-y-beneficios-para-el-transporte-de-cargas/

- **Vagones cisterna:** Empleados para el transporte de líquidos como petróleo, productos químicos o productos alimenticios.

Imagen 7: Ejemplo de vagones cisterna marca Nymwag.

Fuente: Railmarket. (2023). Nymwag entrega vagones cisterna a 4 clientes distintos. https://es.railmarket.com/news/rolling-stock/17335-nymwag-delivers-tank-wagons-to-4-various-customers

- **Vagones frigoríficos:** Especialmente diseñados para transportar productos perecederos, como alimentos y medicamentos, los cuales requieren condiciones de temperatura controlada.

Imagen 8: Ejemplo de vagones frigoríficos de la marca Thermo King.

Fuente: Thermo King. (n.d.). Transport Refrigeration Units for Cargo Rail and Intermodal.https://www.thermoking.com/na/en/rail/cargo.html

- **Vagones de contenedores:** Permiten el transporte de mercancías en contenedores estándar, los cuales también pueden ser trasladados por barco o camión, haciendo más eficiente el comercio intermodal.

Imagen 9: Ejemplo de vagones contenedores.

Fuente: Pinterest. (n.d.). Cargo train image. https://cl.pinterest.com/pin/840484349191549050/

La eficiencia del transporte ferroviario de mercancías radica en su capacidad para mover grandes volúmenes de productos de manera más económica y con un menor consumo de energía en comparación con otros medios, como los camiones. Además, el tren es una opción más ecológica, ya que produce menos emisiones de CO_2 por tonelada transportada que el transporte por carretera o el transporte aéreo.

Ventajas del transporte ferroviario

- ***Eficiencia energética:*** Los trenes son más eficientes en términos de consumo de energía, especialmente cuando se comparan con el transporte aéreo y por carretera.
- ***Capacidad:*** Los trenes pueden transportar grandes cantidades de personas y mercancías a la vez, lo que los convierte en una opción rentable para el transporte masivo.
- ***Sostenibilidad:*** El transporte ferroviario genera menos emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con el transporte por carretera o aéreo, lo que contribuye a la reducción de la huella de carbono.
- ***Conexión entre ciudades y regiones:*** Los trenes facilitan la conectividad entre diferentes regiones, ciudades y países, mejorando el comercio y el turismo, además de fomentar la integración de economías locales.

Los trenes son un componente esencial del transporte moderno, tanto para personas como para mercancías. A lo largo de la historia, su papel ha sido crucial para conectar regiones, facilitar el comercio y estimular el desarrollo económico. A medida que el mundo avance hacia soluciones más sostenibles, los trenes, con su bajo impacto ambiental y su alta capacidad de transporte, seguirán siendo una opción clave en el futuro del transporte global.

Tipos de trenes:

Los trenes se clasifican principalmente en eléctricos y diésel, según la fuente de energía que utilizan. Los trenes eléctricos funcionan mediante la alimentación a través de una red de cables o catenarias, siendo más eficientes y menos contaminantes, ideales para trayectos urbanos y de alta velocidad. Por otro lado, los trenes diésel utilizan motores a combustión interna, lo que les permite operar en rutas sin electrificación, lo que los convierte en una opción versátil para áreas más rurales o donde la infraestructura eléctrica no está disponible. Ambos tipos han revolucionado el transporte ferroviario, cada uno adaptándose a diferentes necesidades y condiciones operativas.

Diferencias entre trenes eléctricos y de combustión.

El transporte ferroviario ha sido crucial en el desarrollo de la infraestructura mundial desde la Revolución Industrial. A lo largo de los años, los trenes han evolucionado considerablemente, adaptándose a los avances tecnológicos y respondiendo a las necesidades cambiantes de la sociedad. Entre las formas más destacadas de trenes, se encuentran los trenes eléctricos y los trenes de combustión. Aunque ambos cumplen funciones similares, como el transporte de pasajeros y mercancías, sus diferencias son significativas en cuanto a funcionamiento, impacto ambiental y eficiencia.

Trenes Eléctricos

Funcionamiento:

Los trenes eléctricos funcionan mediante energía eléctrica que se suministra a través de un sistema externo, generalmente una línea aérea de alta tensión o un sistema de catenaria. Esta energía se transmite al tren a través de pantógrafos o colectores de corriente que permiten establecer conexión con la red eléctrica. Esta es una de las principales ventajas de los trenes eléctricos: no necesitan almacenar energía en baterías o combustibles, sino que dependen de la infraestructura de suministro eléctrico que les rodea.

Imagen 10: Locomotora Eléctrica.

Fuente: European and Jerusalem. (n.d.). The first electric train reaches Jerusalemhttps://europeandjerusalem.com/further-fulfillment-of-herzls-utopia-the-first-electric-train-reaches-jerusalem/

Imagen 11: Sistema de catenaria para la alimentación de trenes eléctricos.

Fuente: Pérez López, R. (2024). [Fotografía]. Metropolitan Train System, San Diego, California.

Imagen 12: Pantógrafo ferroviario.

Fuente: Engineering Master. (2017). Pantógrafo: Cómo se usan en motores de trenes eléctricos. https://engineeringmaster.in/2017/04/23/what-is-pantograph-how-they-are-used-in-electric-rail-engines/#google_vignette

Tipos de fuentes de energía:

- **Electrificación de líneas ferroviarias:** En la mayoría de los trenes eléctricos, la energía proviene de una red externa conectada a estaciones de generación eléctrica. En algunos casos, también se usan fuentes de energía renovables (solar, eólica, etc.) para alimentar estas redes.

Imagen 13: Alimentación de una subestación de tracción al sistema de catenaria.

Fuente: Interempresas. (n.d.).
https://www.interempresas.net/Energia/Articulos/538119-Eiffage-Energia-Sistemas-electrificara-la-linea-de-ferrocarril-Zaragoza-Teruel-Sagunto.html

- **Bajo consumo energético:** En comparación con los trenes de combustión, los trenes eléctricos son más eficientes, ya que convierten una mayor proporción de la energía en movimiento

Ventajas

1. ***Menor impacto ambiental*:** Los trenes eléctricos producen menos emisiones contaminantes en comparación con los de combustión. Si la electricidad proviene de fuentes renovables, la huella de carbono es prácticamente nula.
2. ***Mayor eficiencia energética*:** La energía eléctrica es más eficiente para el transporte ferroviario que los combustibles fósiles, lo que resulta en menores costos operativos a largo plazo.
3. ***Menor ruido*:** Los trenes eléctricos suelen generar menos ruido que los de combustión, lo que contribuye a un entorno más agradable para los pasajeros y las áreas circundantes.
4. ***Menor mantenimiento*:** El sistema eléctrico requiere menos mantenimiento en comparación con los motores de combustión, lo que reduce los costos operativos.
5. **Capacidad para operar a altas velocidades:** Los trenes eléctricos, como los trenes de alta velocidad (HST), pueden alcanzar velocidades mucho mayores que los de combustión debido a la mayor potencia que pueden generar.

Desventajas

1. ***Dependencia de la infraestructura*:** Los trenes eléctricos necesitan estar conectados a una red de energía eléctrica, lo que limita su uso en áreas donde no se ha electrificado el ferrocarril.
2. ***Costos iniciales de electrificación*:** La construcción de la infraestructura necesaria (como catenarias y estaciones eléctricas) es costosa y requieren grandes inversiones.

Trenes de Combustión (Diesel o de Gas)

Funcionamiento:

Los trenes de combustión, en su mayoría, utilizan motores diésel o gas para generar energía. Estos motores funcionan quemando combustibles fósiles, como el diésel o el gas natural, que se almacenan en los depósitos del tren. A través de la combustión interna, los motores generan la energía necesaria para mover el tren. Existen dos tipos principales de trenes de combustión: los trenes diésel-eléctricos, que utilizan un motor diésel para generar electricidad y alimentar motores eléctricos, y los trenes diésel-mecánicos, que utilizan directamente el motor de combustión para mover las ruedas.

Imagen 14: Locomotora a Diesel.

Fuente: GTRZ. (n.d.). TEM7 series diesel locomotives. https://gtrz.com.ua/en/tem7-series-diesel-locomotives/

Ventajas

1. ***Mayor flexibilidad operativa*:** Los trenes de combustión no dependen de la electrificación de las vías. Esto les permite operar en áreas no electrificadas, donde el costo de electrificar las vías sería elevado o inviable.
2. ***Menor coste de infraestructura*:** A diferencia de los trenes eléctricos, los trenes de combustión no requieren una infraestructura externa tan compleja (como las catenarias). Esto reduce los costos iniciales en áreas rurales o poco desarrolladas.
3. ***Mayor autonomía*:** Los trenes de combustión pueden operar durante largos trayectos sin necesidad de infraestructura externa, lo que les permite ser útiles en líneas de larga distancia o zonas sin acceso a redes eléctricas.
4. ***Reducción del impacto visual*:** La ausencia de catenarias o pantógrafos permite a los trenes de combustión integrarse de forma más sencilla en paisajes naturales, sin la alteración visual que a veces conlleva la instalación de líneas eléctricas.

Desventajas

1. ***Mayor impacto ambiental*:** Los trenes de combustión emiten gases contaminantes como dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NOx) y partículas contaminantes, lo que contribuye al cambio climático y la contaminación del aire.

2. ***Mayor consumo de energía:*** Los motores de combustión interna son menos eficientes en la conversión de energía en movimiento, lo que conlleva un mayor consumo de combustible por kilómetro recorrido.
3. ***Mayor mantenimiento:*** Los trenes de combustión tienen mayores necesidades de mantenimiento, especialmente en cuanto a los motores y el sistema de escape.
4. ***Ruido más elevado:*** Los trenes diésel son generalmente más ruidosos que los eléctricos, lo que puede generar molestias para las poblaciones cercanas a las vías.

Trenes Híbridos (Duales)

Funcionamiento:

Los trenes duales son aquellos que tienen la capacidad de operar tanto con electricidad como con combustible (comúnmente diésel), lo que les permite ser más versátiles y operativos en una variedad de condiciones de infraestructura ferroviaria. Esto significa que pueden cambiar de modo según el tipo de línea en la que circulen, lo que resulta útil en regiones donde no hay electrificación a lo largo de toda la red ferroviaria. Así es como funcionan:

Imagen 15: Tren Maya contará con 32 vagones duales

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d1/Tren_X%27-Trapolis_Ts%C3%ADmin_K%E2%80%99%C3%A1ak_arribando_a_la_estaci%C3%B3n_M%C3%A9rida_Teya.jpg

1. Modo eléctrico

- ***Fuente de energía*:** Cuando el tren circula por una línea electrificada, se conecta a una catenaria o línea de contacto que suministra electricidad, generalmente en corriente alterna (CA), dependiendo del sistema ferroviario por el que circulan.

- ***Motor eléctrico*:** En este modo, el tren usa un motor eléctrico alimentado por la energía recibida de la catenaria. Los motores eléctricos permiten una mayor eficiencia energética y son más silenciosos y ecológicos que los motores a combustión.

2. Modo diésel

- ***Fuente de energía*:** Cuando el tren circula por una línea no electrificada o en áreas remotas sin acceso a catenaria, puede cambiar al modo diésel. En este modo, el tren tiene un motor diésel que impulsa el tren de manera autónoma.

- ***Motor diésel*:** Este motor convierte la energía de los combustibles fósiles (diésel) en energía eléctrica, lo que permite que el tren siga funcionando sin la necesidad de una red eléctrica externa. Este sistema es muy útil en líneas secundarias o en lugares donde la electrificación no es rentable o viable.

3. Transición entre modos

Los trenes duales están equipados con sistemas automáticos o manuales para cambiar entre los modos de operación. El cambio puede ser realizado por el conductor, ajustado el sistema según la situación o el tipo de línea por la que circula el tren. La transición generalmente es rápida y no interrumpe el servicio.

Ventajas

- ***Flexibilidad*:** Los trenes duales pueden operar tanto en líneas electrificadas como no electrificadas, lo que les permite adaptarse a diferentes redes ferroviarias.

- ***Reducción de costos*:** No es necesario construir infraestructuras eléctricas en todas las rutas, lo que reduce los costos de mantenimiento y expansión de la red ferroviaria.

- ***Mayor alcance*:** Los trenes duales pueden operar en áreas remotas o rurales donde la electrificación no es práctica, lo que extiende la cobertura del servicio ferroviario.

Desventajas

- ***Mayor complejidad:*** Los trenes duales son más caros tanto en adquisición como en mantenimiento debido a la integración de dos sistemas de propulsión (eléctrico y diésel).

- ***Menor eficiencia en modo diésel:*** En modo diésel, el tren consume más combustible y emite más contaminantes, lo que reduce la eficiencia y el impacto ambiental.

- ***Desgaste adicional:*** Los dos sistemas de propulsión requieren más mantenimiento y pueden reducir la vida útil de los componentes del tren.

- ***Mayor peso:*** El peso adicional por los dos sistemas de propulsión afecta la capacidad de carga y la eficiencia energética.

- ***Complejidad operativa:*** La necesidad de coordinar entre los modos eléctrico y diésel añade complejidad a la gestión de la infraestructura ferroviaria.

Tabla 1: Comparación entre Trenes Eléctricos y de Combustión

Característica	Trenes Eléctricos	Trenes de Combustión	Trenes Híbridos (Duales)
Fuente de Energía	Electricidad (generalmente obtenida de la red)	Combustibles fósiles (diésel, gasóleo, etc.)	Electricidad o Combustibles fósiles (dependiendo de la disponibilidad de la infraestructura)
Eficiencia Energética	Alta eficiencia debido a la conversión directa de la electricidad en movimiento	Menor eficiencia, ya que parte de la energía se pierde en la conversión del combustible en energía mecánica	Alta eficiencia cuando operan en modo eléctrico; eficiencia similar a los trenes de combustión cuando usan combustible
Impacto Ambiental	Menor impacto, especialmente si la electricidad proviene de fuentes renovables	Mayor impacto debido a las emisiones de CO_2 y partículas derivadas de la quema de combustibles fósiles	Menor impacto en zonas electrificadas, pero mayor en áreas no electrificadas (modo diésel)
Costo de Infraestructura	Alto, debido a la necesidad de instalar líneas de alta tensión, subestaciones y catenarias	Bajo en comparación, ya que no requiere infraestructura adicional más allá de las vías y estaciones	Relativamente bajo, ya que puede operar tanto en rutas electrificadas como no electrificadas
Autonomía	Depende de la disponibilidad de electricidad en la red; limitada a rutas electrificadas	Alta autonomía, ya que puede operar sin necesidad de infraestructura eléctrica, dependiendo del suministro de combustible	Alta autonomía, ya que cambia entre eléctrico y diésel según la disponibilidad de la infraestructura
Velocidad	Generalmente más rápido, con mejores capacidades de aceleración y desaceleración	Menor velocidad máxima y aceleración, aunque depende del tipo de motor y combustible	Velocidades similares a los trenes eléctricos en rutas electrificadas, y velocidades comparables a los trenes de combustión cuando operan a diésel
Mantenimiento	Requiere menos mantenimiento en los motores eléctricos, pero el sistema de catenarias y subestaciones puede ser costoso	Mayor mantenimiento debido a los motores de combustión, sistemas de combustible y emisiones que requieren controles más frecuentes	Mantenimiento más complejo, ya que incluye tanto el sistema eléctrico como el motor de combustión, lo que puede mplicar mayores costos y tiempo de servicio
Ruido	Menor nivel de ruido debido al motor eléctrico, especialmente en comparación con trenes de combustión	Mayor nivel de ruido debido al motor de combustión interna y los mecanismos asociados al sistema de propulsión	Ruido moderado: más bajo en modo eléctrico, pero más alto en modo diésel comparado con los eléctricos puros

Fuente: Ramiro Pérez López (Elaboración propia).

Imagen 16: Lado Izq. tren a Diesel, Lado Der. tren eléctrico.

Fuente: Engineering Master. (2017). https://engineeringmaster.in/2017/04/22/is-the-working-of-diesel-and-electric-locomotive-same/

4. Aplicaciones Prácticas

Los trenes eléctricos y de diésel se complementan en la red ferroviaria moderna, adaptándose a diferentes contextos y necesidades. Estos dos tipos de trenes cubren una amplia gama de aplicaciones prácticas, adaptándose a las diversas demandas de movilidad y transporte de mercancías.

- ***Trenes eléctricos:*** Son más adecuados para trayectos de alta demanda en áreas urbanas o interurbanas donde ya existe una infraestructura eléctrica, como los trenes de alta velocidad en Europa y Japón o los trenes suburbanos en grandes ciudades como Londres, Madrid y Berlín.

- ***Trenes de combustión:*** Son ideales en regiones donde la electrificación de las vías es costosa o difícil de implementar. Incluyendo áreas rurales, regiones en desarrollo o tramos de líneas ferroviarias con poco tráfico, como es el caso de los trenes regionales o locales en muchas partes de América Latina y África.

- ***Trenes duales:*** Ofrecen lo mejor de ambos mundos, permitiendo la flexibilidad de operar en rutas electrificadas y no electrificadas. Sin embargo, su mantenimiento y costos operativos pueden ser más altos, ya que combinan tecnologías eléctricas y de combustión.

Los trenes eléctricos como los de combustión tienen su lugar en el panorama ferroviario moderno. Los trenes eléctricos se perfilan como la opción más sostenible y eficiente para el futuro del transporte ferroviario, especialmente en áreas con infraestructura eléctrica disponible. Por otro lado, los trenes de combustión siguen siendo una opción viable para zonas donde la electrificación no es económicamente factible o donde se necesita mayor flexibilidad en la operación. La elección entre uno u otro depende de factores como el coste de infraestructura, la disponibilidad de energía y los objetivos medioambientales de cada región.

Sistemas de Tracción y Energía

Los sistemas de tracción y energía son esenciales en los trenes modernos. En México, las fuentes de energía incluyen electricidad de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y combustibles fósiles. La electricidad generada por energías renovables, como la eólica en Oaxaca, está ganando protagonismo en proyectos ferroviarios, haciendo que los trenes eléctricos sean una opción más sostenible.

Fuentes de energía: Métodos de obtención de energía para trenes.

El sistema ferroviario en el país ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, y los sistemas de tracción y energía son elementos clave para su modernización. Las fuentes de energía utilizadas para operar los trenes varían en función del tipo de tren, la región del país y las condiciones de la infraestructura ferroviaria. En México, las fuentes de energía para trenes abarcan desde combustibles fósiles hasta electricidad generada por fuentes renovables.

A continuación, se exploran los principales métodos de obtención de energía para trenes.

Fuente de energía: La red eléctrica

La electricidad que alimenta estos trenes proviene principalmente de la CFE (Comisión Federal de Electricidad), el mayor proveedor de energía del país. La CFE genera electricidad a través de una combinación de fuentes de energía:

- ***Generación a partir de combustibles fósiles*:** Una parte significativa de la energía eléctrica en México proviene de plantas termoeléctricas que funcionan con gas natural y carbón.

Imagen 17: Central de ciclo combinado de la CFE en Samalayuca, México.

Fuente: Central de ciclo combinado de la CFE en Samalayuca. (s. f.). Recuperado de https://dipsamexico.com/cfe-samalayuca/.

- ***Energías renovables:*** En los últimos años, ha aumentado la participación de las fuentes renovables (eólica, solar e hidroeléctrica) en la generación de electricidad. Las fuentes renovables están en expansión y contribuyen de manera creciente a la reducción de la huella de carbono del sistema eléctrico.

Imagen 18: Central Hidroeléctrica "El Cajón", Nayarit, México.

Fuente: Forbes. (2024). CFE apuesta por minihidroléctricas para tener más energía limpia. Recuperado de https://forbes.-com.mx/cfe-apuesta-por-minihidroelectricas-para-tener-mas-energia-limpia/.)

Imagen 19: Parque de energía eólica, en el estado de Oaxaca.

Fuente: El Financiero. (2024, 22 de mayo). Energía eólica y funcionamiento de trenes suburbanos en México. Recuperado de https://www.elfinanciero.com.mx/economia/2024/05/22/energia-eolica-funcionamiento-de-trenes-suburbanos-en-mexico/.

Fuente de energía: Combustibles fósiles

- ***Gasóleo (diésel):*** La energía de los trenes diésel proviene de los combustibles fósiles, principalmente diésel. México cuenta con refinerías que producen este tipo de combustibles, lo que permite a los operadores ferroviarios abastecer sus locomotoras sin depender de importaciones masivas.

Imagen 20: Motor de locomotora a Diesel

Fuente: Motor de locomotora a Diesel Progress Rail. (s. f.). Locomotive Engines. Recuperado de https://www.progressrail.com/en/Segments/Engines/Locomotive_Engines.html#multimedia-GH8Mr88smmCk19A-poster.

- ***Eficiencia y emisiones:*** Aunque el diésel es una fuente de energía más contaminante que la electricidad, las locomotoras diésel son relativamente eficientes en términos de consumo de combustible. Sin embargo, la quema de diésel produce emisiones de CO2 y otros contaminantes, lo que contribuye al cambio climático y la contaminación del aire.

Energías Renovables: El Futuro Sostenible

Energía solar y eólica

El uso de fuentes de energía renovable está tomando protagonismo en el desarrollo de nuevas infraestructuras ferroviarias, especialmente en proyectos que buscan reducir la huella de carbono y promover la sostenibilidad.

Imagen 21: Parque Eólico y granja solar.

Fuente: National Grid. (s. f.). What are different types of renewable energy. Recuperado de https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/what-are-different-types-renewable-energy.

- ***Trenes solares y eólicos:*** En México, la energía solar y eólica se están desarrollando principalmente en zonas del norte y centro del país, como Baja California y Oaxaca. Si bien actualmente no se han implementado sistemas ferroviarios alimentados exclusivamente por estas fuentes, existe el potencial de aprovechar la electricidad generada por parques solares y eólicos para alimentar la red eléctrica que, a su vez, podría alimentar los trenes eléctricos. Actualmente el 98% de la demanda energética de los ferrocarriles suburbanos de México proviene de la energía eólica, lo que contribuye a que el país reduzca las emisiones contaminantes de su sistema de transporte.

Imagen 22: Tren suburbano CDMX.

Fuente: ALAMYS. (s. f.). Ferrocarriles suburbanos celebra una década de acortar distancias. Recuperado de https://www.alamys.org/es/noticias/ferrocarriles-suburbanos-celebra-una-decada-de-acortar-distancias/.

- ***Futuro del transporte ferroviario verde:*** A medida que la proporción de energía renovable en la red eléctrica de México aumente, es probable que más trenes eléctricos puedan operar con energía limpia, lo que contribuirá a un sistema ferroviario más sostenible.

El panorama energético para los trenes en México es diverso y está en proceso de transformación. Mientras que la tracción diésel sigue siendo la opción más común debido a su flexibilidad y la falta de electrificación extensiva, el futuro de los sistemas ferroviarios en el país apunta a un mayor uso de energía eléctrica y energías renovables.

- ***Electrificación y sostenibilidad:*** A largo plazo, la tendencia hacia la electrificación de las líneas ferroviarias, combinada con el uso de fuentes renovables, puede reducir significativamente las emisiones de gases contaminantes y mejorar la eficiencia del sistema ferroviario.

- ***Trenes híbridos y tecnologías emergentes:*** Los trenes híbridos representan una solución a corto plazo en áreas con infraestructura mixta, mientras que las tecnologías emergentes de almacenamiento y gestión energética continuarán jugando un papel clave en la transición hacia un sistema ferroviario más verde y eficiente.

El desarrollo de estos métodos de obtención de energía será clave para el crecimiento de la infraestructura ferroviaria en México, contribuyendo a un transporte más eficiente, seguro y sostenible.

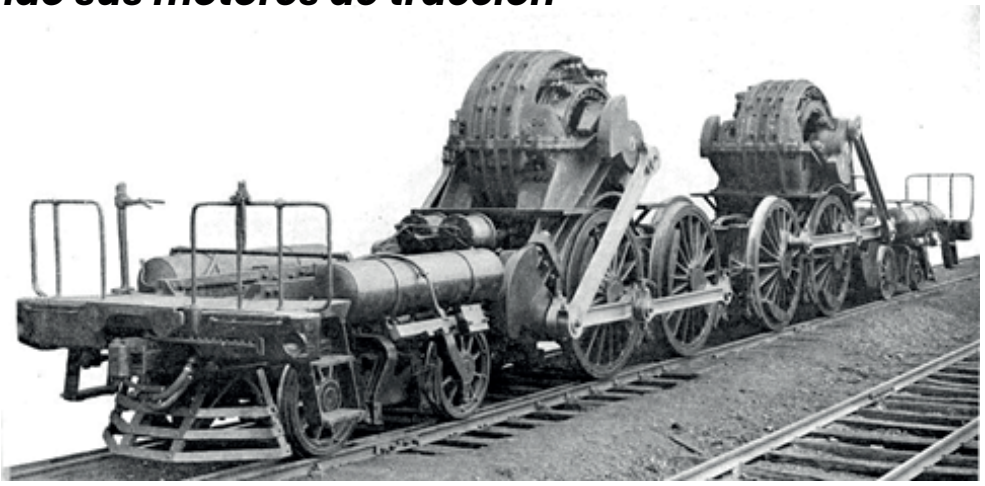
Funcionamiento del sistema de tracción:

El sistema de tracción convierte la energía eléctrica en movimiento mecánico a través de motores eléctricos. En los trenes eléctricos, el frenado regenerativo destaca como una innovación clave, permitiendo recuperar energía durante las paradas y reutilizarla para alimentar el tren o devolverla a la red. Esto mejora significativamente la eficiencia energética, reduciendo costos operativos.

Motores y su relación con el sistema de frenado.

Los sistemas de tracción y energía son componentes clave en el funcionamiento de los trenes y otros vehículos ferroviarios. Estos sistemas permiten que el tren se desplace a lo largo de las vías y que su movimiento se controle de forma eficiente. En este contexto, los motores y el sistema de frenado están estrechamente relacionados, ya que ambos sistemas están involucrados en la dinámica del vehículo, en la aceleración, deceleración y el mantenimiento de la velocidad.

Imagen 23: Locomotora eléctrica PRR DD1, sin la carrocería, mostrando sus motores de tracción



Fuente: Wikipedia. (s. f.). Motor de tracción. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_de_tracci%C3%B3n.

Sistema de Tracción: Principales Componentes

El sistema de tracción es responsable de generar la potencia necesaria para mover el tren. En los trenes modernos, esta función se realiza mediante motores eléctricos o, en algunos casos, motores diésel. Este sistema se compone de:

- ***Motores de tracción*:** Los motores eléctricos, comúnmente motores de corriente continua (CC) o alterna (CA), se encargan de convertir la energía eléctrica en movimiento mecánico. Los motores están conectados a las ruedas a través de transmisiones que transmiten la potencia.

Imagen 24: Motor de tracción.

Fuente: ScienceDirect. (2022). Motor de tracción. Recuperado de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722023460

- ***Convertidores de energía*:** Los convertidores de corriente (rectificadores o inversores) se encargan de transformar la energía de la red de suministro (típicamente de corriente alterna en los sistemas de trenes modernos) en la forma adecuada para alimentar los motores eléctricos.

Imagen 25: Convertidor de tracción eléctrica.

Fuente: CAF Power & Automation. (s. f.). Convertidor DC 750V. Recuperado de https://www.cafpower.com/es/sistemas/traccion-electrica/convertidores-dc/convertidor-dc-750v.

- ***Baterías (en algunos casos):*** En trenes híbridos o que operan en áreas donde la energía eléctrica no está disponible, se puede utilizar energía almacenada en baterías para ayudar en el funcionamiento del tren.

Imagen 26: Baterías de locomotora híbrida.

Fuente: LinkedIn. (s. f.). Train battery market worth $758 million by 2030. Recuperado de https://www.linkedin.com/pulse/train-battery-market-worth-758-million-2030-pankaj-k-1f.

- ***Sistemas de control:*** Los sistemas de control y gestión de la energía permiten regular la cantidad de potencia que se envía a los motores en función de las necesidades del tren (aceleración, velocidad de crucero, etc.).

Imagen 27: Sistema de control de tracción.

Fuente: Heinzmann. (s. f.). Sistema de control de tracción. Recuperado de https://www.heinzmann.com/en/application-areas/locomotives/digital-control.

Funcionamiento del Sistema de Tracción: Los Motores

En los trenes eléctricos, los motores de tracción juegan un papel fundamental. El funcionamiento de los motores de tracción puede ser descrito de la siguiente manera:

- ***Conversión de energía eléctrica en movimiento*:** La energía eléctrica suministrada desde la red ferroviaria es utilizada por los motores para generar un campo magnético. La interacción de este campo magnético con el rotor del motor genera el movimiento rotatorio necesario para impulsar las ruedas del tren.

- ***Regulación de velocidad*:** La velocidad del tren se controla mediante la cantidad de energía eléctrica que llega a los motores, lo que se ajusta mediante los sistemas de control electrónico. Al aumentar la energía suministrada, el tren acelera, mientras que la disminución de la energía provoca la desaceleración.

- ***Motores de corriente continua (CC) y alterna (CA)*:**
  - ***Motores CC*:** Aunque en el pasado fueron los más comunes, su uso ha disminuido en favor de los motores CA, que son más eficientes y requieren menos mantenimiento. Los motores CC son más fáciles de controlar en términos de velocidad, pero requieren sistemas de conmutación y mantenimiento más frecuentes.

  - ***Motores CA*:** Utilizan la corriente alterna para funcionar, generalmente alimentados por convertidores de corriente de la red. Estos motores son más eficientes y robustos, con un menor requerimiento de mantenimiento.

Imagen 28: Mantenimiento de un motor de tracción.

Fuente: Houghton International. (s.f.). AC & DC Traction Motors Overhaul & Repair Services. Houghton International, de https://www.houghton-international.com/service/ac-dc-traction-motors-services/ac-dc-traction-motors-overhaul-repair-services/

Relación entre el Sistema de Tracción y el Sistema de Frenado

El frenado en los trenes es un componente esencial para garantizar la seguridad, el control y la eficiencia operativa en el transporte ferroviario. Existen varios sistemas de frenado, cada uno diseñado para adaptarse a las características específicas del tren, el tipo de vía y las condiciones operativas. Los sistemas más comunes incluyen el frenado neumático, que utiliza aire comprimido para accionar las zapatas de freno; el frenado regenerativo, que convierte la energía cinética del tren en electricidad, que luego se devuelve a la red o se almacena para su uso posterior; y el frenado mecánico, que implica el contacto directo de las zapatas con las ruedas o los discos de freno. Estos sistemas pueden operar de manera individual o en combinación, lo que permite una mayor versatilidad y eficacia en la detención del tren, especialmente en diferentes condiciones de carga, clima y terreno. Además, el desarrollo de nuevas tecnologías ha permitido mejorar la precisión y la rapidez de respuesta de los frenos, contribuyendo a una mayor seguridad en el sistema ferroviario.

- ***Frenado mecánico (tradicional):*** Este tipo de frenado utiliza frenos de fricción que actúan sobre las ruedas del tren para reducir la velocidad. Es el método más común, pero también el más "costoso" en términos de energía, ya que convierte la energía cinética en calor, lo que implica una pérdida de energía.

Imagen 29: Freno mecánico.

Fuente: Trenvista. (s.f.). ¿Cómo frenan los trenes?. Trenvista, de https://www.trenvista.net/a-fondo/como-frenan-los-trenes

- ***Frenado regenerativo:*** Este es uno de los sistemas más avanzados y eficientes en los trenes eléctricos modernos. Durante el proceso de frenado, los motores de tracción funcionan en modo inverso, actuando como generadores. En este proceso, la energía cinética del tren se convierte en energía eléctrica, que se puede devolver a la red ferroviaria o almacenarse en baterías para su uso posterior.

Imagen 30: Freno regenerativo.

Fuente: CFL. (s.f.). The braking system – simply explained. CFL Blog., de https://blogcfl.lu/en/simply-explained/the-braking-system

Frenado regenerativo y sistema de tracción

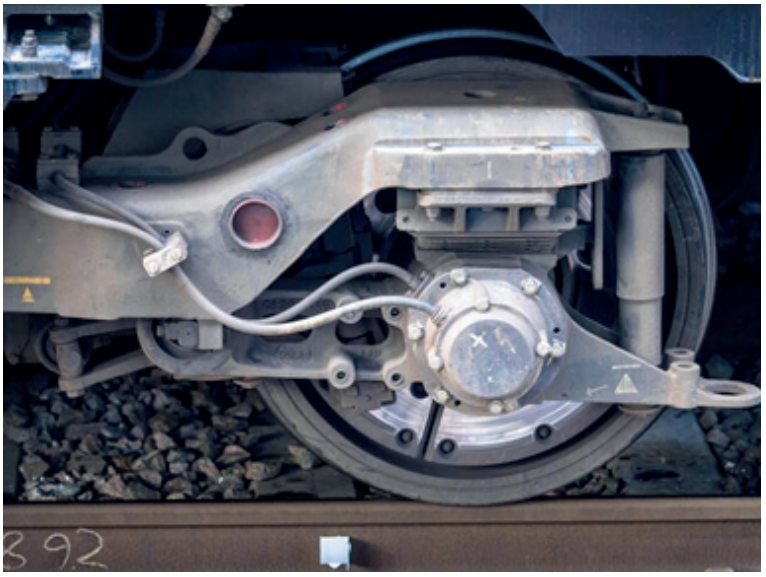
En este sistema, cuando el tren reduce su velocidad, los motores de tracción operan en modo generador, convirtiendo la energía cinética en electricidad. En lugar de disipar toda la energía en calor, se reutiliza. Esta energía recuperada puede ser utilizada para alimentar otros trenes o para alimentar la propia operación del tren cuando es necesario, lo que incrementa la eficiencia general del sistema.

- ***Ventajas del frenado regenerativo:*** Mejora la eficiencia energética al reducir el consumo de energía y minimizar las pérdidas térmicas asociadas con el frenado convencional.

- ***Desventajas del frenado regenerativo:*** Los frenos regenerativos en trenes tienen limitaciones como menor eficiencia a bajas velocidades, dependencia de infraestructura eléctrica, y la necesidad de frenos convencionales para un frenado completo. Además, requieren mantenimiento especializado, pueden sobrecargar la red eléctrica y ofrecen una sensación de frenado diferente.

- ***Frenado por aire comprimido (frenos neumáticos):*** En combinación con los sistemas de freno mecánico, muchos trenes utilizan frenos neumáticos, que funcionan utilizando aire comprimido para accionar las zapatas de freno sobre las ruedas.

Imagen 31: Freno neumático.



Fuente: (Alamy. (s.f.). British train wheels with air brakes, UK train wheels on a Greater [Fotografía]. Alamy, de https://www.alamy.com/british-train-wheels-with-air-brakes-uk-train-wheels-on-a-greater-image155858790.html

Sinergia entre Tracción y Frenado

La sinergia entre el sistema de tracción y el sistema de frenado es clave para lograr una operación eficiente y segura. El uso de sistemas avanzados como el frenado regenerativo mejora la eficiencia energética, pero también implica una coordinación precisa entre los sistemas de tracción y los de frenado.

- ***Cuando el tren acelera:*** Los motores de tracción trabajan para convertir la energía eléctrica en movimiento, impulsando las ruedas.

- ***Cuando el tren frena:*** Los motores de tracción pueden invertir su función, actuando como generadores para aprovechar la energía cinética y devolverla al sistema eléctrico. Esta función no solo reduce la velocidad del tren, sino que también mejora la eficiencia energética global al aprovechar el proceso de frenado.

- ***Optimización del consumo energético:*** Un tren que utiliza el frenado regenerativo puede reducir significativamente su consumo de energía y minimizar la necesidad de energía externa. Esta optimización es particularmente importante en sistemas ferroviarios de alta velocidad o en trenes de larga distancia.

Tecnologías Emergentes y Tendencias

En el futuro, se están desarrollando tecnologías avanzadas que mejorarán tanto la eficiencia de la tracción como del frenado:

- ***Sistemas de energía de almacenamiento:*** Los trenes podrían beneficiarse de sistemas de almacenamiento de energía más avanzados, como las baterías de alto rendimiento, para mejorar la eficiencia en las estaciones o en tramos sin suministro eléctrico continuo.

- ***Frenado regenerativo mejorado:*** Se está trabajando en mejorar la eficiencia de los sistemas de frenado regenerativo para que se puedan recuperar aún más niveles de energía durante el frenado.

- ***Trenes híbridos:*** Combinando motores diésel con eléctricos, estos trenes pueden operar en zonas sin acceso a la red eléctrica, pero aún así utilizar el frenado regenerativo en las secciones eléctricas.

El sistema de tracción y energía, junto con el sistema de frenado, son fundamentales para garantizar la operación eficiente y segura de los trenes. A través de tecnologías avanzadas como los motores eléctricos de alta eficiencia y el frenado regenerativo, es posible reducir el consumo energético y aprovechar la energía de manera más eficiente, lo que resulta en una mayor sostenibilidad del transporte ferroviario. Además, la interacción entre estos dos sistemas es esencial para mantener el control del tren en diversas condiciones de operación, optimizando tanto la aceleración como la desaceleración.