

ESTUDIO PARA EL USO DE HIDROGENO VERDE EN UN SISTEMA FERROVIARIO EN COLOMBIA

Presentado para obtener el título de

MAGÍSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

Andrés Eduardo Táutica Mancera

Dirección:

Luis Miguel Diazgranados Berenguer

Universidad del Rosario

Escuela de Ingeniería, Ciencia y Tecnología

Maestría Energías Renovables

AGRADECIMIENTO

ii

Expreso toda mi gratitud a mi papá y mamá, los cuales me han formado y guiado a nivel personal y profesional, contribuyendo a lograr los objetivos que me he planteado a lo largo de mi vida; así como a ser una personal integral. Adicionalmente, toda mi gratitud con mi mentor y director de este Proyecto de Grado, Luis Miguel Diazgranados, quien, con todo su conocimiento, dedicación y pasión por el tema de este estudio, aportó para lograr concluir con éxito este ciclo de la Maestría en Energías Renovables.

El proyecto “*Estudio para el uso de Hidrógeno Verde en un sistema Ferroviario en Colombia*” abordará principalmente dos problemáticas, las cuales son: i) la falta de competitividad en la cadena logística del transporte y ii) la lucha contra el cambio climático. En ese sentido, se desarrolló un estudio a nivel de prefactibilidad, el cual analizó la competitividad del transporte Férreo de carga propulsado con Hidrógeno a partir de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable – FNCER, dentro de un espectro de posibilidades que abarca la propulsión con combustible Diesel (el cual será nuestra línea base o caso Business as usual) y electrificación mediante catenaria.

Para desarrollar este estudio, se propuso implementar una metodología de valoración multicriterio, en donde se seleccionaron diversos parámetros económicos, ambientales, tecnológicos y de mercado, los cuales evaluaron la factibilidad de cada una de las alternativas planteadas, obteniendo como resultado una sensibilidad de alto nivel para examinar la viabilidad de implementar un recambio tecnológico que contribuya a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, sin sacrificar parámetros de competitividad.

TABLA DE CONTENIDO

iv

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 2 OBJETIVOS	3
1.1 Objetivo general	3
1.2 Objetivos específicos.....	3
Capítulo 3 METODOLOGÍA.....	4
Capítulo 4 PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	5
Capítulo 5 ESTADO DEL ARTE	9
Capítulo 6 DESARROLLO DEL ESTUDIO	15
6.1 RED FERREA EN COLOMBIA	15
6.2 SELECCIÓN DEL CORREDOR FERREO	16
6.3 MATRIZ MULTICRITERIO.....	19
6.4 SUPUESTO Y DATOS DE ENTRADA	24
6.5 RESULTADOS	36
Capítulo 7 CONCLUSIONES.....	51
REFERENCIAS	52

LISTA DE TABLAS

v

Tabla 1 Características Corredor Férreo Cerrejón.....	18
Tabla 2 Definición de RIRL	23
Tabla 3 Escenarios a evaluar	23
Tabla 4 Estructura de Costos	24
Tabla 5 Resumen datos de entrada para TCO	34
Tabla 6 Resultados del TCO.....	36
Tabla 7 Resultados de la Matriz Multicriterio.....	19

LISTA DE FIGURAS

vi

Figura 1 Diagrama de Flujo de la Metodología.....	4
Figura 2 Participación Sector Transporte	6
Figura 3 Participación Transporte Terrestre.....	7
Figura 4 Consumo de H2 en Sector Transporte (IEA Global Hydrogen Review, 2022).....	9
Figura 5 Red Férrea en Colombia (Ministerio de Transporte, 2020).....	15
Figura 6 Localización Cerrejón (Informe de Sostenibilidad Cerrejón, 2022).....	16
Figura 7 Proceso del Carbón (Información General de las Operaciones de Cerrejón, 2012)	17
Figura 8 Trazado vía férrea (Google Earth, 2023)	19
Figura 9 Componentes del TCO (Elaboración Propia)	20
Figura 10 TCO discriminado por componente	37
Figura 11 TCO discriminado por componente (%).....	37
Figura 12 CAPEX discriminado por componentes	40
Figura 13 CAPEX discriminado por componentes (%)	40
Figura 14 Emisiones vs Consumo	42
Figura 15 Costo de Abatimiento.....	43
Figura 16 Tiempo de operación.....	44
Figura 17 Km de vía por tecnología	45
Figura 18 Nivel de Maduración.....	46
Figura 19 Análisis de Sensibilidad para distintos escenarios	47
Figura 20 Puntaje Final de Alternativas	48

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

El concepto de desarrollo sostenible involucra tres dimensiones: equidad social, eficiencia económica y eficiencia ambiental, las cuales deben converger para establecer que una actividad productiva se enmarca en los principios de sostenibilidad (Rodrigue Jean Paul, 2020). En materia social, se deben dar condiciones que favorezcan una distribución equitativa en función del riesgo y los esfuerzos que se realicen. En términos económicos, permitir condiciones que generen mayores niveles de eficiencia en términos de uso de los recursos y adicionalmente aumentar las capacidades, competitividad, la flexibilidad en la producción; así como la provisión de bienes y servicios que abastezcan las necesidades de consumo. En cuanto a la dimensión ambiental, esta refiere a la huella de carbono que genera el realizar actividades productivas, teniendo como objetivo la disminución de las emisiones contaminantes.

En el marco del principio de sostenibilidad, Colombia ha concentrado esfuerzos para contribuir en la lucha contra el cambio climático, estableciendo acuerdos a nivel internacional como el Acuerdo de París, en aras de reducir los efectos causados por los Gases de Efecto Invernadero, siendo el sector transporte un gran contribuyente con cerca del 12,5% en las emisiones generadas por el país (Inventario de GEI para Colombia, 2018).

Las necesidades en materia de transporte con el despliegue de sistemas modernos como eje impulsor de las economías han posicionado el sector como una importante fuente de emisiones contaminantes. Desde finales del siglo XX, las políticas de transporte a nivel mundial han estado orientadas a promover e impulsar cada vez más la intermodalidad, a través de la articulación de una red estratégica que conecte los centros de producción de las industrias con los puntos de exportación o consumo. Es así como el componente logístico del transporte representa un concepto fundamental en el desarrollo económico, social y ambiental del país.

En síntesis, se ha seleccionado el segmento del transporte de carga, representado por el transporte ferroviario, debido a que este sector representa una oportunidad para aportar en el marco de la descarbonización así como la relevancia que tiene en la competitividad y multimodalidad del transporte logístico de carga, siendo el modo férreo impulsado por las recientes políticas del Gobierno, las cuales buscan promover y consolidar la operación férrea en el País, a través del Plan Maestro Ferroviario.

En consecuencia, este estudio pretende resolver preguntas como ¿podría ser competitivo en la actualidad la propulsión de Sistemas Férreos de carga con Hidrógeno Verde en comparación con las tecnologías convencionales?, ¿cuáles son los componentes relevantes en la estructura de costos que permitirán viabilizar tecnologías alternativas de propulsión como el Hidrógeno Verde?, ¿qué ventajas y desventajas presenta el Hidrógeno Verde como vector energético frente a otras tecnologías de descarbonización?

Por último, En la primera sección del documento se aborda la definición de objetivos y el problema. En la segunda parte se expone el contexto y el marco de desarrollo del estudio. En la tercera parte se realiza el desarrollo del estudio y finalmente, en la cuarta parte se hace un análisis comparativo y se definen las principales conclusiones.

Capítulo 2

OBJETIVOS

Los siguientes, son los objetivos definidos para el proyecto de grado:

1.1 Objetivo general

Desarrollar un estudio a nivel de prefactibilidad que evalué la pertinencia de implementar un sistema ferroviario propulsado con Hidrógeno Verde, comparándolo con otras tecnologías de descarbonización.

1.2 Objetivos específicos

- Determinar una alternativa de corredor férreo con el propósito de realizar análisis comparativos con base en parámetros técnicos, económicos, ambientales y de mercado entre diferentes tecnologías de propulsión.
- Evaluar alternativas de propulsión del sistema ferroviario (Diesel, Catenaria, Hidrógeno Verde) teniendo en cuenta los parámetros mencionados en el punto anterior,
- Analizar y presentar las estrategias para la implementación de un sistema ferroviario propulsado con Hidrógeno Verde.

Capítulo 3

METODOLOGÍA

La metodología establecida para el desarrollo del estudio se basó en el siguiente diagrama de flujo:

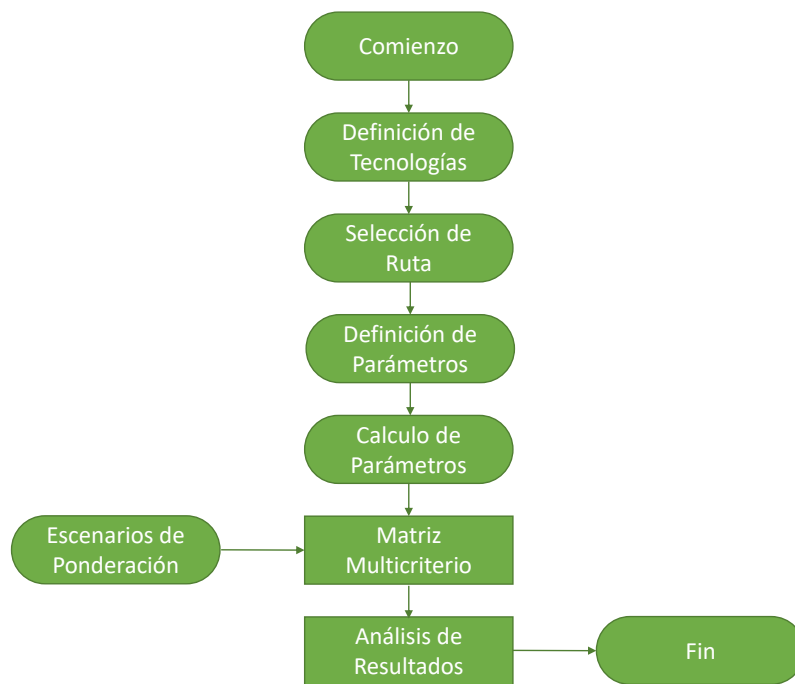


Figura 1 Diagrama de Flujo de la Metodología

A continuación, se expondrán cada uno de los pasos:

- **Definición de Tecnologías:** Esta actividad tiene como propósito, seleccionar las diferentes tecnologías de propulsión del sistema férreo que fueron comparadas (Diesel, Catenaria e Hidrogeno Verde)
- **Selección de Ruta:** Esta actividad tiene como propósito, seleccionar un corredor férreo específico en el País, definiendo sus características principales las cuales se tendrán en cuenta para el cálculo de los parámetros.
- **definición de Parámetros:** En este paso, se establecieron los parámetros a comparar para cada una de las tecnologías de propulsión. Basados en criterios ambientales, económicos, tecnológicos y de mercado. En términos económicos, se estableció un modelo de prefactibilidad a nivel de costos.

- **Cálculo de Parámetros:** En este paso se realizaron los cálculos de los parámetros de cada una de las tecnologías de propulsión.
- **Escenarios de Ponderación:** En esta actividad se definen las diferentes ponderaciones que tendrá cada uno de los parámetros definidos, en aras de establecer escenarios que permitan tener diferentes enfoques de evaluación.
- **Matriz Multicriterio:** Matriz de calificación la cual tiene como entradas los resultados de cada uno de los parámetros asociados a cada tecnología de propulsión así como los diferentes escenarios de ponderación. El resultado de la matriz será una calificación para cada tecnología y para cada escenario de ponderación.
- **Análisis de Resultados:** Obtenidos los resultados de la matriz multicriterio, se procedió a realizar el análisis correspondiente, generando conclusiones y recomendaciones.

Por otra parte, el presente documento abarca el uso de herramientas y técnicas típicas de un estudio a nivel de prefactibilidad, las cuales están dadas por la utilización de información secundaria de fuentes oficiales, académicas e industriales – las cuales se encuentran listadas en el capítulo de Bibliografías -, adaptación de información al contexto nacional, estimaciones paramétricas para el cálculo de costos, comparación a nivel de ordenes de magnitud de variables con referencias encontradas en la literatura, apoyo en estudios similares a nivel internacional y mundial, cálculos de diseños a nivel conceptual entre otros.

Capítulo 4

PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

De acuerdo con el último Inventario de Gases de Efecto Invernadero - GEI realizado en el año 2018 por parte del IDEAM, PNUD y el MADS, las dos fuentes emisoras de GEI más relevantes son la agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra - AFOLU, con el 59,1% de participación; seguido por energía con el 30,7% (donde participan subcategorías de

industrias de la energía, industrias manufactureras y de la construcción, transporte, combustibles sólidos, petróleo y gas natural, y otros sectores).

Dentro de la categoría de energía, el sector transporte representa el mayor aportante a los GEI con una participación del 12,5% (37.826,95 Gg CO₂ eq). Profundizando en este sector, el transporte terrestre lidera las emisiones con el 78 % (29.601,91 Gg CO₂ eq), siendo el transporte de carga uno de los mayores aportantes – junto con los automóviles - con el 28% para un total de 8.345,14 Gg de CO₂ eq al año. Por otro lado, el sector de Ferrocarriles solo representa el 0,24 % de participación de las emisiones del sector transporte con cerca de 89,69 Gg, lo cual es argumentado por el bajo uso de la infraestructura férrea, que actualmente es propulsada con tecnología Diesel.

Las siguientes imágenes exponen lo indicado anteriormente:

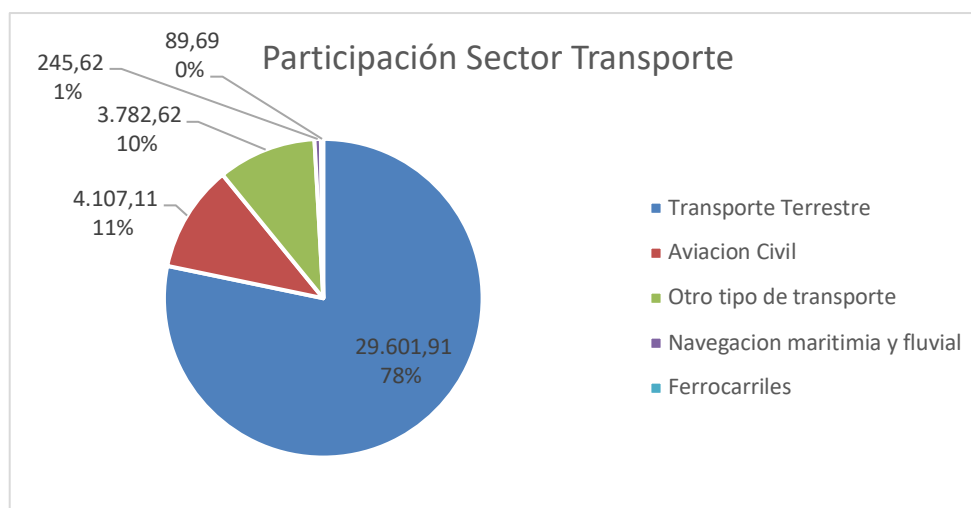


Figura 2 Participación Sector Transporte

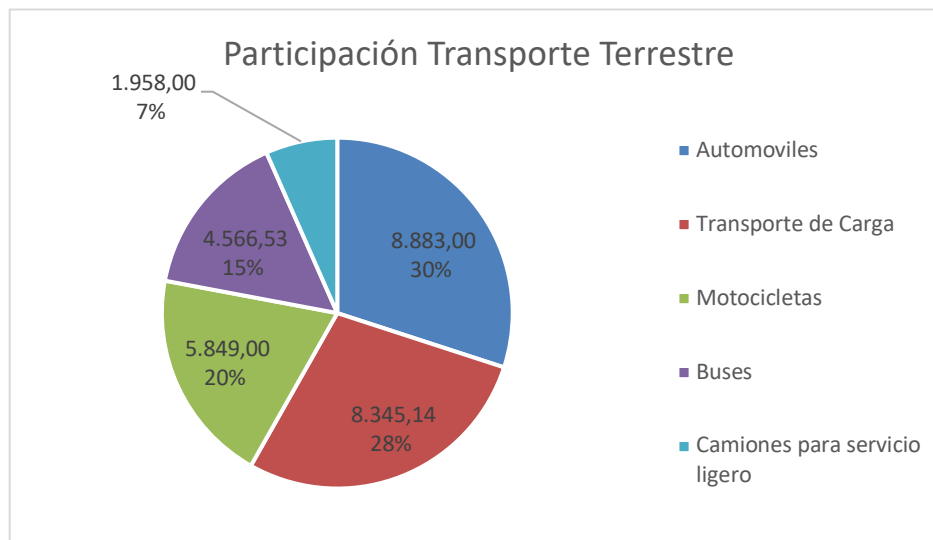


Figura 3 Participación Transporte Terrestre

Con base en lo mencionado anteriormente, el sector del transporte de carga representa una oportunidad para aportar en la reducción de las emisiones de GEI con otros modos de transporte con igual o mayor eficiencia, competitividad propulsados con tecnologías de bajas emisiones.

La anterior descripción nos da un panorama de la importancia de concentrar esfuerzos para realizar reconversiones tecnológicas en el sector del transporte de carga, la cual puede ser aportada por el modo férreo propulsado por tecnologías que aporte a reducir las emisiones de GEI que actualmente están generando.

En ese sentido, es importante mencionar, que el transporte férreo ha movilizadado en promedio el 21% de la carga total del País (Ministerio de Transporte, 2020), lo que lo convierte en el segundo modo de transporte de mercancías – después del transporte por carretera -, siendo el carbón el principal producto, donde Colombia es el quinto mayor exportador a nivel mundial.

Por otro lado, una sustitución y/o complemento del transporte férreo por el transporte de carga, permitirá aportar a la economía y a la reducción de los costos logísticos en hasta el

26% (DNP, 2018) lo que deriva en menores precios de los bienes transportados y aumenta el nivel de competitividad (CEPAL, 2013).

Así mismo, tomando las cifras mencionadas con anterioridad, el 21 % del total de la carga al año se ha movilizado por las vías férreas – apalancado por las exportaciones de Carbón -, representando el 0,24 % de las emisiones totales para el sector Transporte. Es así como un escenario optimista de reemplazar el 50% del transporte de carga terrestre por modalidad férrea propulsado con energéticos de bajas o ceros emisiones, representará una disminución del 4.172,57 Gg de CO₂ eq, pasando de una participación actual de 28% al 16%.

El anterior panorama se alinea con los objetivos que ha adquirido el País a nivel internacional en la lucha contra el cambio climático, los cuales han sido adoptados mediante la Ley 2169 de 2021, definiendo las siguientes metas:

- Reducción en 51% de las emisiones de GEI proyectadas para 2030.
- Que los sectores de la economía (salud, transporte, minas y energía, comercio, industria, turismo, vivienda y agricultura) desarrollen acciones de adaptación al cambio climático de acuerdo con sus condiciones.
- Elaborar la estrategia para la transición justa de la fuerza laboral hacia una economía resiliente y baja en carbono.

En suma, el compromiso de Colombia en la reducción de los impactos causados por el cambio climático, sumado a la promoción del modo férreo para impulsar la competitividad por medio de las políticas del Gobierno, particularmente con la expedición del Plan Maestro Ferroviario en el 2020 -que es la hoja de ruta para promover y fortalecer el sistema férreo mejorando la eficiencia y competitividad de los costos logísticos- son los principales elementos motivadores para proponer como proyecto de grado, el desarrollo de un estudio de prefactibilidad en la implementación de un sistema ferroviario propulsado con

Hidrógeno Verde, que pueda ser usado en el futuro como herramienta de análisis en los proyectos ferroviarios de carga proyectados.

Capítulo 5

ESTADO DEL ARTE

Haciendo uso de la revisión documental encontrada en la literatura, se expone a continuación, el estado del arte más relevante por temáticas, los cuales fueron considerados como elementos de apoyo y contexto para el desarrollo del presente estudio:

- Estadística de la Industria del Hidrogeno

De acuerdo con el último informe publicado por la Agencia Internacional de Energía – IEA en septiembre del 2022, la demanda total de hidrógeno (sumado todas las rutas de producción) en el 2021 fue de 94 millones de toneladas (Mt), superando el valor alcanzado en el 2019 el cual es tomado como referencia siendo tiempo de prepandemia. Este valor alcanzado fue impulsado por usos tradicionales en industrias y sector de refinación, aunque las aplicaciones en nuevos usos crecieron un 60% desde el 2020, estableciéndose en cerca de 40 mil toneladas.

Específicamente para el sector transporte, el panorama de consumo actual es el siguiente:

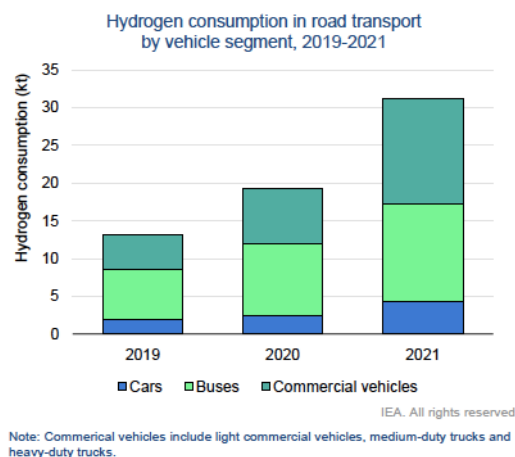


Figura 4 Consumo de H₂ en Sector Transporte (IEA Global Hydrogen Review, 2022)

La demanda actual para el sector transporte a nivel mundial es cerca de 30 kilotoneladas (kT), lo cual representa un aumento del 60% comparado con el año 2020, y un 0,03 % de participación en la matriz general de consumo.

La contribución del sector transporte en la matriz de consumo, evidencia que el transporte por carretera es el que actualmente impulsa la demanda, y más específicamente lo es el transporte pesado y los buses, debido a las largas trayectorias que tienen que recorrer, así como el peso que transportan. Es por ello por lo que, en los últimos años, los vehículos de transporte pesado propulsados por hidrógeno han aumentado en más de 60 veces su parque comparado con el 2020. En materia de sector ferroviario, en Europa se han empezado a implementar proyectos para movilización de pasajeros, como lo ha hecho Alemania, pero este uso es aún incipiente a nivel mundial donde la demanda para el año 2021 fue de menos de 0.1 kT. No obstante, con los anuncios por parte de distintos gobiernos, se espera que el uso del hidrógeno en el transporte ferroviario aumente en los próximos años.

- Proyectos en desarrollo a nivel mundial

Los siguientes, son algunos de los proyectos más representativos a nivel mundial que han comenzado el camino de la propulsión de sistemas ferroviarios con hidrógeno:

Proyecto Alstom's Coradia iLind (Alstom, 2021): Es el primer proyecto a gran escala desplegado en el mundo para el transporte de pasajeros propulsado con hidrógeno. Entre el 2018 y 2022, fueron realizadas pruebas de campo en las cuales dos trenes recorrieron cerca de 180.000 km de servicio regular con pasajeros en Alemania. Adicionalmente se han realizado pruebas con este prototipo en Austria, Francia, Países Bajos y Suecia.

Proyecto FCH2Rail (CAF, 2022): a finales del mes de mayo del 2022, la empresa CAF (compañía ferroviaria en España) inicio pruebas estáticas en su planta de Zaragoza del tren propulsado por hidrógeno, en el cual participan las empresas CAF, DLR, Toyota, Renfe, Adif, CNH2, IP y FAIVELEY Stemmann Technik.

El proyecto contempla tomar como base una unidad actual de cercanías de RENFE, en la cual se instalará un sistema de generación de electricidad a partir de una hibridación de la energía que proviene de una celda de combustible y de unas baterías, la cual se integrarán con el sistema de tracción existente del tren. Este sistema podrá funcionar a partir de tramos con catenaria o en modo híbrido en tramos que no tengan electrificación con catenaria. Por su parte, el hidrógeno utilizado para la propulsión será renovable, el cual va a hacer suministrado por la empresa Iberdrola.

Este proyecto cuenta con un presupuesto de 14 millones de euros, de los cuales 10 millones serán financiados por parte de Clean Hydrogen Partnership, anteriormente agencia de la Comisión Europea dedicada a impulsar el desarrollo del hidrógeno y las pilas de combustible.

Proyecto East Japan Railway (Railway Technology, 2022): La empresa East Japan Railway ha presentado un tren de prueba impulsado por hidrógeno que cuenta con un sistema de pilas de combustible y baterías. Este es el primer prototipo que se construyen en Japón, el cual es llamado Hydrogen Hybrid Advanced Rail Vehicle for Innovación – HYBARI.

Se planea que este tren realice pruebas de funcionamiento este 2023, con el propósito de iniciar operación comercial en este mismo año. Las respectivas pruebas se realizarán en la línea Nanbu que conecta la estación Tachikawa en Tokio, con la estación Kawasaki, en Kanagawa. Por su parte, la empresa Toyota Motor ha desarrollado el sistema de pila de combustible, mientras que la empresa Hitachi proporcionará el sistema de propulsión híbrido. El presupuesto definido para este proyecto es de 34,7 millones de dólares, logrando que el tren alcance una autonomía de 140 km con una carga.

Proyecto en China (Green Car Congress, 2021): China ha iniciado las pruebas de la primera locomotora en el País propulsada con hidrógeno en una línea ferroviaria que tiene 627 km de longitud utilizada para transportar carbón en la región autónoma de Mongolia.

Este proyecto fue lanzado de manera conjunta por las empresas Inner Mongolia de State Power Investment Corporation Limited – SPIC, CRRC Daton Co y Hydrogen Energy. La empresa CRRC fue la encargada de desarrollar la locomotora utilizando celdas de combustible que desarrollo la empresa SPIC.

Esta locomotora presenta una velocidad de diseño de 80 km/h, la cual funcionará con 700 KW de potencia, durante 24,5 horas a plena recarga, llegando alcanzar una carga máxima de tracción en línea recta de 5.000 toneladas.

De acuerdo con información del proyecto, comparado con locomotoras propulsadas con Diesel, las locomotoras con hidrógeno pueden reducir las emisiones de carbono en aproximadamente 80 kg por cada 10.000 toneladas por km. Se espera que este proyecto reduzca las emisiones de carbón en 96.000 toneladas al año.

- Estado actual de proyectos Ferroviarios en Colombia

A Partir de la expedición del Plan Maestro Ferroviario en el año 2018 por parte del Gobierno Nacional, se establecieron unos espacios de articulación con la participación de entidades a nivel nacional, territorial y sector privado, con el propósito de revisar y tomar acciones entorno al avance de la implementación de los proyectos ferroviarios en el País. En ese sentido, la última Mesa Ferroviaria realizadas en agosto del 2022, realizo la revisión del avance de los siguientes proyectos:

- Primera Línea del Metro de Bogotá
- Línea 2 del Metro de Bogotá
- Tren del Café

- Tren del Río
- Tren Verde
- Tren de Urabá
- Sistema Masivo Urabá
- Sistema Masivo Oriente (Antioquia)
- Metro de la 80 (Bogotá)
- Proyecto Tren de Cercanías Valle del Cauca
- Tren Regional del Caribe

- Estudios de propulsión de hidrogeno en sistemas ferroviarios

Diversas organizaciones a nivel mundial han empezado a realizar estudios para determinar la viabilidad de implementar sistemas ferroviarios de carga y pasajeros con Hidrogeno que puedan eliminar la problemática generada por altas emisiones en trenes cuyo combustible es el Diesel. En ese sentido, se presentan algunos estudios desarrollados:

- Estudio del uso de Celdas de Combustible e Hidrogeno en un ecosistema Ferroviario

Estudio financiado por Shift2Rail y Fuel Cells and Hydrogen - FCH, desarrollado por la firma Roland Berger, en cual fue lanzado en el año 2019 con el objetivo de evaluar el estado del arte, caso de negocio, mercado potencial y tanto barreras de acceso técnicas y no técnicas para la implementación de trenes propulsados a partir de celdas de combustible, los cuales pueden ayudar a sustituir los actuales sistemas ferroviarios propulsados con Diesel y de esa forma contribuir a la descarbonización.

El estudio abarca cuatro capítulos que son: i) Trenes FCH en la actualidad, ii) Mercado potencial de Trenes FCH en Europa, iii) Casos de estudio y iv) Recomendaciones para una exitosa implementación de la tecnología FCH en trenes.

Dentro de los casos de estudio analizados, fueron abordados 10 con enfoque en aplicaciones de Multiple Units(pasajeros), Shunter y Mainline Locomotive (para transporte de carga), comparando alternativas de propulsión con Diesel, FCH y Catenaria.

En ese sentido, se presentan las principales conclusiones que arrojó el estudio:

- Los últimos desarrollos en Alemania y Francia demostraron que FCH podrá complementar la electrificación en Europa y permitir la completa descarbonización in las vías férreas
- FCH en el ecosistema ferroviario compite con tecnologías existentes como Diesel y catenaria, pero también con tecnologías emergentes como baterías.
- El estudio demuestra que los trenes FCH cumplen las especificaciones del sistema ferroviario tan bien como la tecnología diésel.
- La aplicación más madura para trenes FCH son las de múltiples unidades(pasajeros), que podrán ser costos eficientes respecto al Diesel en el corto tiempo, especialmente en lugares donde la producción de hidrogeno es economía.
- Económicamente, FCH puede superar la catenaria donde la frecuencia del servicio sea baja, sin renunciar a las ventajas medioambientales de la electrificación.
- Gracias a su larga autonomía y rápido repostaje, FCH superara las limitaciones de las baterías.
- Debido a su competitividad, FCH Multiple Units, puede potencialmente reemplazar el 30% del Diesel para el 2030.
- Shunters y Mainline Locomotives, siguen con una implantación relativamente modesta en el mercado, es gran medida debido al su entrada tardía en el mercado, la cual no se espera que pase hasta el 2023, siendo necesario seguir desarrollando la tecnología.

Capítulo 6

DESARROLLO DEL ESTUDIO

6.1 RED FERREA EN COLOMBIA

En materia de infraestructura férrea, el país cuenta con 3.515 km de red, de los cuales el 52% es operable y el 48% no cuenta con las condiciones necesarias para su operación (Ministerio de Transporte, 2020). De la infraestructura operable, se pueden identificar corredores estratégicos los cuales son: Corredor Central con 767 km que conecta La Dorada-Chiriguana-Ciénega- Santa Marta; la red del Pacífico con 498 km que conecta Buenaventura-La Felisa y el ramal de Zarzal-La Tebaida; el corredor Facatativá-Bogotá-Belencito con 287 km y el ramal La Caro-Zipaquirá con 19 km. Adicionalmente, se encuentran en operación dos corredores privados, uno de ellos perteneciente a la empresa Carbones del Cerrejón, con una extensión aproximada de 150 km.

El siguiente mapa muestra la actual red férrea del País:



Figura 5 Red Férrea en Colombia (Ministerio de Transporte, 2020)

6.2 SELECCIÓN DEL CORREDOR FERREO

Con base en lo expuesto en secciones anteriores donde se referencio que, en materia de transporte de carga por vía férrea, el carbón era el producto con mayor movilización en el País, fue seleccionado para el análisis, el corredor Férreo de la Empresa Carbones el Cerrejón Ltda. siendo este uno de los trayectos que ha tenido a lo largo de décadas una operación estable y constante. A continuación, se presentan las características más relevantes de la operación de Cerrejón, la cual sirvió de contexto para el estudio.

Carbones el Cerrejón Ltda. es una empresa perteneciente al Grupo Glencore encargada de explorar, producir, extraer, transportar y exportar carbón térmico de una de las minas a cielo abiertas más grandes del mundo, ubicada en jurisdicción de los municipios de Distracción, Fonseca, Barrancas, Hatonuevo y Albania en el departamento de la Guajira, en donde se tienen un total de 6 tajos a cielo abierto, sobre los cuales la empresa realiza sus operaciones, mediante un contrato de concesión que inicio en 1976, estando vigente actualmente hasta el año 2034 para la producción, teniendo en la actualidad una producción cercana a los 19,7 Millones de Toneladas (Informe de Sostenibilidad Cerrejón, 2022).

La siguiente es la ubicación de la infraestructura de operación de Cerrejón:

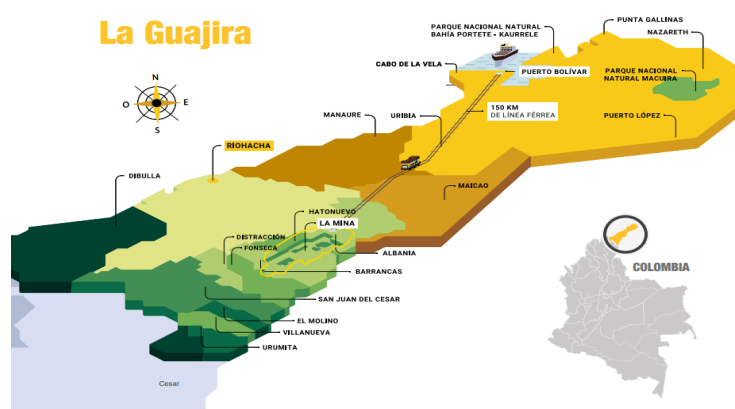


Figura 6 Localización Cerrejón (Informe de Sostenibilidad Cerrejón, 2022)

El proceso del manejo del Carbón se realiza en varias etapas que van desde la apertura y adecuación de los tajos (zonas autorizadas para la explotación), explotación, cargue en

camiones, transporte hasta zona de adecuación donde se realiza el lavado, trituración, almacenamiento en los silos, transporte por vía férrea hasta Puerto Bolívar, descargue, apilado, cargue en contenedores y transporte hasta el cliente final. La siguiente imagen ilustra lo expuesto anteriormente:

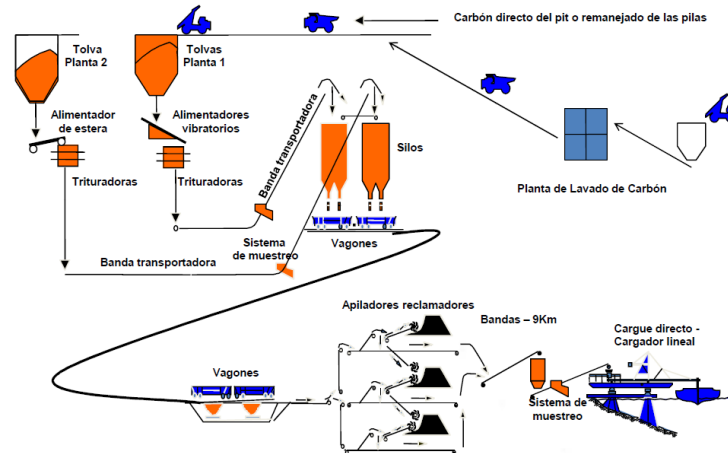


Figura 7 Proceso del Carbón (Información General de las Operaciones de Cerrejón, 2012)

Enfocándonos en el componente del transporte por el corredor férreo, esta es una operación que se realiza mediante un sistema de cargue y descargue automático, la cual comunica la operación Minera con Puerto Bolívar, en un recorrido aproximado de 4 horas, 150 km entre estos dos puntos, un promedio de 5 a 6 trenes diarios para transportar 80.000 toneladas diarias de carbón. Es relevante mencionar que la operación de la vía férrea inicio en el año 1984 transportando 8.500 toneladas. (Cerrejón, 2023), estando activa durante 39 años.

A continuación, se expone la información recabada que sirvió de insumo para desarrollar el modelo:

Tabla 1 Características Corredor Férreo Cerrejón

OPERACIÓN SISTEMA FERROVIARIO DE CERREJON	
PARAMETRO	VALOR
Longitud (km)	150
Composición del Convoy	2 locomotoras + 120 Vagones
Cantidad de Vagones en Stock	541 de 108 Ton c/u 19 de 96 Ton c/u
Capacidad por Vagón [Ton]	60 a 110
Propulsión	Diesel
Longitud del Convoy [km]	2,5
Consumo de energía por Convoy[gal/milla]	1,5
Cantidad de Locomotoras en Stock	13 marca GE (B36-7) 3600 HP (2685 kW) 1 Marca GE 4400: 4400 HP
Cantidad de Aparcaderos	4
Capacidad Total (Millones de Toneladas al año - Mtpa)	32
Cantidad de Carbón Transportada Diaria [Ton]	80.000
Cantidad de Trenes Diarios	6
Tiempo total del Ciclo en Horas (cargue, transporte, descargue)	12,7
Tiempo recorrido Mina - Puerto Bolívar Horas	4
Distancia a recorrer por día [km]	900
Días de Operación al año	365
Disponibilidad del tren [%]	95
Distancia recorrida por año [km]	312.075

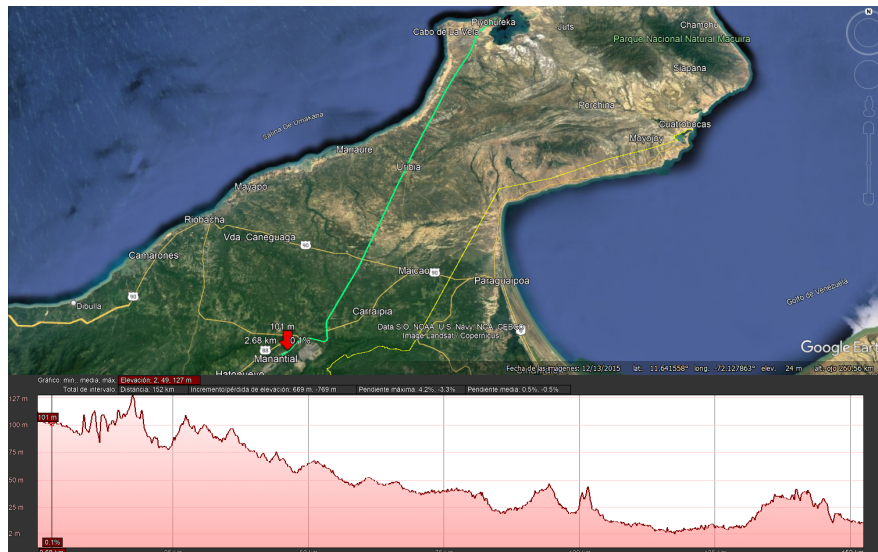


Figura 8 Trazado vía férrea (Google Earth, 2023)

6.3 MATRIZ MULTICRITERIO

La matriz multicriterio es una matriz de calificación cuyo propósito es evaluar a nivel comparativo cada uno de los parámetros que se definirán para las tres alternativas de propulsión. En ese sentido, a continuación, se realiza la caracterización de esta matriz, detallando a nivel conceptual, cada uno de los componentes involucrados para su operación:

6.3.1 Selección de Ruta:

La ruta seleccionada es el corredor Férreo de Cerrejón, cuyos argumentos y especificaciones fueron mencionados en la sección anterior.

6.3.2 Definición de Tecnologías

- Propulsión con Motor Diesel-Eléctrico
- Propulsión con Catenaria
- Propulsión mediante Fuel Cell Hydrogen – FCH con motor Eléctrico

6.3.3 Definición de Parámetros

El análisis comparativo considero los siguientes parámetros, enmarcados en económicos, ambientales, tecnológicos y de mercado:

6.3.3.1 Parámetros Económicos:

- Total Cost of Ownership - TCO: El costo total de propiedad, es un indicador utilizado en la industria del transporte, el cual permite normalizar y comparar entre diferentes modalidades, los costos totales de adquirir, operar y mantener un activo a lo largo de su vida útil, permitiendo así tener comparaciones justas entre distintas soluciones que puedan tener costos diferentes. Este indicador fue medido en USD/km.

La siguiente imagen indica los componentes principales que se tienen en cuenta en el momento de calcular el TCO:



Figura 9 Componentes del TCO (Elaboración Propia)

Así mismo, se presenta la formulación que fue utilizada para el cálculo del TCO:

$$TCO \left[\frac{USD}{km} \right] = \frac{CAPEX_0 + \sum_{i=0}^N (Cop_i + Cm_i) - V_r}{\sum_{i=0}^N km}$$

Donde:

$CAPEX_0$ = Costo de inversión en el año 0

Cop_i = Costos de operación en el año i traído a valor presente.

Cm_i = Costos de mantenimiento en el año i traído a valor presente.

V_r = Valor residual de los activos. km = Distancia recorrida al año traído a valor presente

- CAPEX: Es el costo total de inversión asociada a cada tecnología. Este parámetro tiene en cuenta los costos asociados a la implantación del sistema férreo en el año 0, el cual se midió en M USD.
- Costo de Abatimiento - CA: Es el costo asociado al valor monetario de reducir una tonelada de emisión de CO2 equivalente con determinada tecnología, respecto a un valor base, el cual en este caso estará dado por el caso base que es la propulsión mediante Diesel. Este indicador fue medido en unidades de USD/Ton

La formulación que fue utilizada para calcular este parámetro fue la siguiente:

$$CA \left[\frac{USD}{Ton} \right] = \left(\frac{TCO_x - TCO_{Diesel}}{Emisiones_x - Emisiones_{Diesel}} \right) \times km$$

Donde:

TCO_x = Total Cost of Ownership de la tecnología x (Catenaria o FCH)

TCO_{Diesel} = Total Costo of Ownershipt de la tecnología base (Diesel)

$Emisiones_x$ = Emisiones de CO2 eq al año de la tecnología x (Catenaria o FCH)

$Emisiones_{Diesel}$ = Emisiones de CO2 eq al año de la tecnología base (Diesel)

km = distancia total recorrida en un año, la cual de acuerdo con la

Tabla 1 es de 312.075 km

6.3.3.2 Parámetros Ambientales

- Emisiones de CO2 eq Tank To Wheel – TTW: Este parámetro establece el total de emisiones de CO2 equivalente que emiten las 3 tecnologías evaluadas (Diesel, Catenaria, FCH) en un año para el componente denominado Tank To

Wheel, el cual es “del tanque a la rueda” es decir, solo se tienen en cuenta lo que genera el ferrocarril cuando se encuentra circulando. Este indicador fue medido en unidades de Toneladas CO₂ eq al año.

La formulación que fue utilizada para calcular este parámetro fue la siguiente:

$$TTW \left[\text{Ton} \frac{\text{CO}_2}{\text{año}} \right] = FE \times CE$$

Donde:

FE = Factor de emisión asociada a cada tecnología medida en KgCO₂eq/gal o TonCO₂/MWh

CE = Consumo energético asociada a cada tecnología medida en gal/año o MWh/año

6.3.3.3 Parámetros Tecnológicos

- Km de vía de carga por tecnología: Este parámetro define la cantidad de kilómetros de vía férrea en operación, los cuales son utilizados en el transporte de carga, propulsados para cada una de las tecnologías seleccionadas.,
- Tiempo de operación: Este parámetro defina la cantidad de años de operación para cada una de las tecnologías seleccionadas, siendo al igual que el parámetro anterior, un factor que mide el nivel de maduración tecnología. Este indicador fue medido en unidades de cantidad.

6.3.3.4 Parámetros de Mercado

- Nivel de maduración: Este parámetro mide el nivel de maduración que presenta cada una de las tecnologías seleccionadas, de acuerdo con el siguiente criterio: Indicador RIRL “Rail Industry Readiness Levels” (European Investment Bank, 2022)

Tabla 2 Definición de RIRL

RIRL	Definición
1: Concepcion	La industria es consciente de una oportunidad
2: Desarrollo de oportunidades	La industria es capaz de concebir planes sobre su despliegue
3: Prueba de concepto	Se realiza un diseño conceptual y se apoya en experimentos
4: Especificación industrial	Se planifica la producción del concepto
5: Prototipo	La industria es capaz de preproducir utilizando un sistema definido
6: Transición operative	Se dispone de demostradores operativos realistas
7: Despliegue inicial	Los fabricantes están establecidos y listos para suministrar
8: Lanzamiento	Los clientes empiezan a implantar la tecnología
9: Implantación madura	El producto puede suministrarse

Definidos los parámetros a evaluar, la metodología de la matriz multicriterio estableció unos escenarios de evaluación que definirán la ponderación de cada uno de los 4 parámetros generales a evaluar (Económicos, Ambientales, Tecnológicos, Mercado), lo cual permitirá valorar situaciones desde diferentes ópticas o roles (ejemplo Instituciones de Gobierno, Sector Privado, Academia, Autoridades Ambientales, Proveedores, Investigadores).

Los siguientes son los escenarios evaluados, así como las ponderaciones que fueron asociados con cada uno de estos:

Tabla 3 Escenarios a evaluar

Numero	Escenario	Económico	Ambiental	Tecnológico	Mercado
1	Escenario Igual distribución por componente	25%	25%	25%	25%
2	Escenario balanceado con prioridad en Económico	40%	20%	20%	20%

Numero	Escenario	Económico	Ambiental	Tecnológico	Mercado
3	Escenario balanceado con prioridad en Ambiental	20%	40%	20%	20%
4	Escenario balanceado con prioridad en Mercado	20%	20%	20%	40%
5	Escenario balanceado con prioridad en Económico y Ambiental	50%	50%	0%	0%

Finalmente, el modelo desarrollado calcula para cada uno de los escenarios, una puntuación en un rango de 0 a 1, donde 1 es el valor más favorable para cada uno de los parámetros.

6.4 SUPUESTO Y DATOS DE ENTRADA

La matriz multicriterio fue alimentada de un compendio de información, la cual será descrita a continuación para cada uno de los parámetros definidos, así como los supuestos que permitieron realizar la valoración:

6.4.1 Total Cost of Ownership – TCO y CAPEX:

En términos generales, el cálculo del TCO de las 3 tecnologías de propulsión, incorporo la siguiente estructura de costos, así como los siguientes componentes, los cuales son los diferenciales que hacen sentido para el objetivo del estudio:

Tabla 4 Estructura de Costos

COMPONENTE	DIESEL	FCH	CATENARIA
Locomotora	CAPEX	CAPEX	CAPEX
Fuel Cell Hydrogen	N/A	CAPEX	N/A
Infraestructura de Carga - IC	CAPEX	CAPEX	CAPEX
Consumo Energético	OPEX	OPEX	OPEX
Mantenimiento Locomotora	OPEX	OPEX	OPEX
Mantenimiento IC	OPEX	OPEX	OPEX

- CAPEX:
 - Costo de la locomotora con el sistema de propulsión: este costo incluye tanto el costo de adquisición de la locomotora, como la instalación de los sistemas para propulsión para las diferentes tecnologías.
 - Costo de la infraestructura de carga: este costo incluye la inversión asociada a la infraestructura necesaria para producir o abastecer el energético que utilizara cada tecnología (Catenaria: Redes e infraestructura eléctrica, FCH: Hydrogen Refuelling Station – HRS, Electrolizador)
- OPEX:
 - Costo de mantenimiento de la locomotora: incluye los costos asociados al mantenimiento periódico que se debe realizar a las locomotoras, incluida las reposiciones.
 - Costo de mantenimiento de la infraestructura de carga: incluye los costos asociados al mantenimiento periódico que se deber realizar a la infraestructura de carga.
 - Costo del energético: incluye el costo asociado al energético utilizado para la propulsión de cada tecnología (Diesel, Electricidad para Catenaria y FCH)

El detalle de la información utilizada para cada tecnología se presenta a continuación:

6.4.1.1 Propulsión con Motor Diesel-Eléctrico

- Costo de la locomotora con el sistema de propulsión

El modelo de la locomotora utilizada para calcular los costos fue la GE 4400 de 4400 HP relacionada en secciones anteriores (“Selección del Corredor Férreo”), siendo esta la utilizada actualmente por Cerrejón para el transporte.

El costo por unidad de locomotora para el modelo GE 4400 fue definido en 2,95 M USD (Zenith, Isaac, Hoffrichter, Thomassen, Moller-Holst, 2019)

➤ Costo de la infraestructura de carga

Se asumió un costo de infraestructura de carga tipo Estación de Servicio – EDS de 5 M USD, la cual servirá de repostaje para el combustible Diesel utilizado por las locomotoras. Por otro lado, se asumió que la compra al mayorista efectuado por la empresa Cerrejón, incluye el transporte hasta la EDS.

➤ Costo de mantenimiento de la locomotora

El costo del mantenimiento fue definido en 2,1 USD/km por tren al año (Escobar, 2017), lo cual da un valor total de 0,65 M USD.

➤ Costo de mantenimiento de la infraestructura de carga

Se considero el 2% del valor de inversión de la EDS como costo anual del mantenimiento de la infraestructura de carga.

➤ Costo de operación del energético

El costo de compra al mayorista del combustible Diesel, fue establecido en 2,09 USD/Gal (UPME, 2022), el cual representa el valor promedio actual de comercialización del energético. Por lado, fue definido un consumo promedio de 0,93 gal/km (Cerrejón, 2012), con el cual teniendo en cuenta la distancia total recorrida en un año definida en la

Tabla 1, se obtiene el costo total por año.

6.4.1.2 Propulsión mediante Catenaria

➤ Costo de la locomotora con el sistema de propulsión

El análisis realizado para seleccionar la locomotora eléctrica se basó en encontrar un modelo análogo con características similares al ferrocarril actual que utiliza Cerrejón, el cual es el modelo GE 4400 de 4400 HP (3,2 MW AC). Dentro de la

revisión documental realizada, se encontró que el modelo adecuado para hacer la homologación es el General Electric – GE ES44AC, el cual presenta 3,28 MW AC de potencia de tracción y 196 Toneladas de peso.

Seleccionada la locomotora eléctrica, se definió un costo de inversión de 4,10 M USD por locomotora (Zenith, Isaac, Hoffrichter, Thomassen, Moller-Holst, 2019).

➤ Costo de la infraestructura de carga

El costo asociado a la infraestructura eléctrica, compuesta por las redes eléctricas áreas, subestaciones de alimentación al tren y otras facilidades fue definido en 0,15 M USD/km - basado en información de proyectos diseñados en Estonia por parte de la empresa Ardanuy Ingeniería S.A -, lo cual representa un costo total de 22,7 M USD para el corredor de Cerrejón, teniendo en cuenta la distancia recorrida consignada en la

Tabla 1

➤ Costo de mantenimiento de la locomotora

El costo de mantenimiento de la locomotora eléctrica fue establecido en 3,03 USD/km (Zenith, Isaac, Hoffrichter, Thomassen, Moller-Holst, 2019), lo cual representa un valor total de 0,95 M USD al año.

➤ Costo de mantenimiento de la infraestructura de carga

El costo de mantenimiento asociado a la infraestructura eléctrica de carga fue establecido en 5,88 USD/km (Zenith, Isaac, Hoffrichter, Thomassen, Moller-Holst, 2019), lo cual representa un valor total de 1,84 M USD al año.

➤ Costo de operación del energético

Para definir el costo asociado al consumo de electricidad por parte del Sistema Férreo, se tuvo en cuenta la siguiente información:

$$Demanda \left[\frac{MWh}{año} \right] = Pl \times Fu \times 365 \times Di$$

Siendo:

Pl = Potencia Nominal de cada Locomotora, definida en 3,28 MW AC

Fu = Factor de utilización del motor, definido en 43% (Roland Berger, 2019)

Di = Disponibilidad del tren, la cual fue asumida en 95%.

La anterior información, permite calcular un consumo total al año por locomotora de 11.451.07 MWh/año

Por otro lado, se asumió que el suministro de electricidad es realizado a través de un contrato Purchase Power Agreement – PPA producido por plantas solares. En ese sentido, el precio de compra de la electricidad fue tomado con base en los resultados de la última Subasta de Energías Renovables - CLPE realizada por el Ministerio de Minas y Energía en el año 2021, en donde los adjudicados fueron en su totalidad parques Solares.

El resultado de la subasta de 2021 tuvo un precio promedio de adjudicación el cual traído al presente resulta en 52,45 USD/MWh.

6.4.1.3 Propulsión mediante Fuel Cell Hydrogen – FCH con motor Eléctrico

Los insumos necesarios para realizar el cálculo del TCO para la tecnología FCH incluyo un dimensionamiento a nivel conceptual, abordando el consumo de H2 de las locomotoras, autonomía, tamaño de la HRS y electrolizador. Para esto, se presenta a continuación el desarrollo del diseño a nivel conceptual:

- **Diseño Conceptual**

El cálculo de la demanda de Hidrogeno, fue realizada con base en la siguiente formula:

$$Demanda \left[\frac{Ton}{año} \right] = Co \times Ra$$

Donde:

Co = Consumo del H₂, el cual fue estimado en 0,67 kg/km (Roland Berger, 2019)

Ra = Recorrido anual, el cual fue calculado con base en la siguiente formula:

$$Ra \left[\frac{km}{año} \right] = Dp \times T \times 365 \times Di$$

Donde Dp = Distancia recorrida por trayecto, la cual es de 150 km (

Tabla 1)

T = Numero de trayectos al día

Di = Disponibilidad del tren, la cual fue asumida en 95%.

Con la información anterior, se obtiene una necesidad de 670 kg/día por locomotora, para un total de 1340 kg/día para la totalidad de las locomotoras (2 de acuerdo con lo referenciado en

Tabla 1) y 464, 64 Ton/año.

A partir de este dato, se estableció que se requiere de un HRS a ubicarse en la Mina, que este en capacidad de producir los 1340 kg/día (considerando una reserva de 11%), asumiendo un repostaje promedio entre 30 minutos a una hora a 350 bares de presión (Roland Berger, 2019) y una autonomía diaria de 1000 km, lo cual establece que se debe realizar repostaje cada día.

Asi mismo, para el dimensionando de la planta de producción de Hidrogeno, se tuvieron en cuenta los siguientes cálculos:

$$Potencia [MW] = \frac{Demanda(dia)}{Re}$$

Siendo:

Re = el rendimiento de producción, el cual, de acuerdo con la literatura, se estima que 1 MW produce 18 kg de H₂.

Y donde:

$$Demanda(dia) = \frac{Demanda(año)}{(24 \times Fc)}$$

Siendo:

$Demanda(año)$ = la demanda calculada anteriormente, la cual es de 1340 kg/día
 Fc = el factor de capacidad fue definido en 95%, siendo este un valor que, de acuerdo con la revisión documental, hace sentido para tener un grado de competitividad elevado. Este factor de capacidad se asume que será obtenido a partir de contratos Power Purchase Agreement – PPA con plantas solares, que garanticen un suministro de electricidad constante que permita obtener una producción elevada de H₂.

De acuerdo con la información anterior, se obtiene una potencia de Electrolizador de 3,27 MW.

Para el dimensionamiento de cada Fuel Cell que contendrá cada Locomotora, se tuvieron en cuenta los siguientes cálculos:

$$Potencia [MW] = Pl \times Fu$$

Donde:

Pl = Potencia de cada Locomotora, la cual de acuerdo con la información suministrada en la

Tabla 1, fue seleccionada en 3,28 MW, siendo esta, la versión comercial disponible hoy en día más cercana a la Locomotora de Cerrejón.

Fu = Factor de utilización del motor, el cual fue establecido en 43% (Roland Berger, 2019)

De acuerdo con la información anterior, se estableció el tamaño de cada la Fuel Cell es de 1,41 MW.

Por otro lado, el dimensionamiento del Tanque de Almacenamiento se realizó con base en los siguientes cálculos:

$$Tamaño [KWh] = Demanda \times E$$

Siendo:

Demanda = 670 kg/día (calculado en secciones anteriores)

E = Energía que contiene 1 kg de H₂, la cual según la revisión documental es de 33,6 kWh

Con la información anterior se obtiene que para almacenar los 670 kg de hidrogeno al día que se requieren por locomotora, el tanque debe estar dimensionado para 22.512 KWh.

➤ Costo de la infraestructura de carga

El costo de la infraestructura de carga para la propulsión con FCH considero tanto la HRS como la planta de producción de Hidrogeno. En ese sentido, a continuación, se presenta la definición de los costos, la cual tuvo como insumo el diseño conceptual realizado en la sección anterior:

Dimensionado el HRS y el Electrolizador, se definió para el primero un costo de inversión de 6,45 M USD (Roland Berger, 2019) y un valor de 1800 USD/kW para el Electrolizador (Zenith, Isaac, Hoffrichter, Thomassen, Moller-Holst, 2019), lo cual resulta en un costo de inversión de 5,88 M USD para este último.

➤ Costo de la locomotora con el sistema de propulsión

El costo de cada locomotora (sin la Fuel Cell) fue definido en 4,1 M USD (Zenith, Isaac, Hoffrichter, Thomassen, Moller-Holst, 2019), el cual es el mismo valor utilizado para la tecnología de Catenaria, debido a que se considera el mismo principio de funcionamiento dado que la tracción tanto en la tecnología de Catenaria como en la FCH se realizara a través de un motor eléctrico cuya selección se hizo homologando las características del motor Diesel.

Finalmente, dimensionados la Fuel Cell y el Tanque de Almacenamiento para cada locomotora, se estableció un costo de 262 USD/kW para el primero y 21 USD/kWh para el segundo (Zenith, Isaac, Hoffrichter, Thomassen, Moller-Holst, 2019), resultado en un costo total de 0,84 M USD para los dos componentes.

➤ Costo de mantenimiento de la locomotora

El costo asociado al mantenimiento de la locomotora fue definido en 1,21 USD/km (Roland Berger, 2019), lo cual resulta en un valor de 0,37 M USD para un total de 312.075 km al año por locomotora.

➤ Costo de mantenimiento de la infraestructura de carga

El costo asociado al mantenimiento del HRS fue estimado como un 3% del valor del CAPEX resultando en un valor de 0,19 M USD y para el Electrolizador se definió un costo de 106,5 USD/kW con lo cual se obtuvo un valor de 0,35 M USD.

➤ Costo de operación del energético

Para definir el costo asociado al consumo de electricidad por parte del Electrolizador, se tuvo en cuenta la siguiente información:

$$Demanda \left[\frac{MWh}{año} \right] = Pe \times Fc \times 365 \times Di \times Cf$$

Siendo:

Pe = Potencia del Electrolizador, definida en 3,27 MW

Fc = Factor de capacidad, definido en 95 % (argumentado en la sección del diseño conceptual)

Di = Disponibilidad del tren, la cual fue asumida en 95%.

Cf = Disponibilidad del tren, la cual fue asumida en 95%.

La anterior información, permite calcular un consumo total al año de 28.530,55 MWh/año

Por otro lado, se asumió que el suministro de electricidad es realizado a través de un contrato Purchase Power Agreement – PPA producido por plantas Solares. En ese sentido, el precio de compra de la electricidad fue tomado con base en los resultados de la última Subasta de Energías Renovables - CLPE realizada por el Ministerio de Minas y Energía en el año 2021, en donde los adjudicados fueron en su totalidad parques Solares.

El resultado de la subasta de 2021 tuvo un precio promedio de adjudicación el cual traído al presente resulta en 52,45 USD/MWh.

6.4.1.4 Supuestos Generales

Los siguientes fueron los supuestos establecidos para el cálculo del TCO:

- Infraestructura de la vía férrea presenta condiciones óptimas para la circulación de los trenes.
- Los costos que son iguales para las tres tecnologías no fueron tenidos en cuenta dado que no representa un factor diferencial (ejemplo: mantenimiento de la vía férrea, mantenimiento de los vagones etc)
- No se consideró costos de inversión ni mantenimiento para la infraestructura de carga de la tecnología Diesel debido a que no representa valor agregado.
- El modelo de cálculo del TCO no considero costos de financiamiento, depreciaciones, amortizaciones, valor de salvamento ni incentivos tributarios.
- Se considero una inflación constante de 6% para efectos de proyectar los costos de OPEX, de acuerdo con proyecciones del Fondo Monetario Internacional.
- Se considero que no existen restricciones de disponibilidad de espacio, para la instalación de la infraestructura de carga en las tecnologías de Catenaria y FCH.
- Cada uno de los tanques de almacenamiento de la FHC estarán instalados en los vagos de carga (1 tanque por vagón).
- El dimensionamiento de la FCH se hizo con base un diseño conceptual.
- Se normalizo para las tres tecnologías una vida útil de 20 años.

- De acuerdo con la revisión literaria, fue considerado una WACC de 11%, la cual se encuentra en el rango aceptable para este tipo de proyectos

6.4.1.5 Resumen de datos

La siguiente tabla, resumen los datos seleccionados y calculados para el análisis del TCO:

Tabla 5 Resumen datos de entrada para TCO

PARAMETROS DE ENTRADA	UNIDAD	DIESEL	FCH	Catenaria
Locomotora	M USD	5,9	8,20	8,20
Fuel Cell Hydrogen	M USD	N/A	1,68	N/A
Infraestructura de Carga - IC	M USD	5,00	12,33	22,71
Consumo Energetico	H2V y Catenaria: MWh/año Diesel: Gal/año	580.459,50	28.530,55	22.902,14
Costo del Energetico	H2V y Catenaria: USD/MWh Diesel: USD/gal	2,09	52,45	52,45
Mantenimiento Locomotora	M USD	1,31	0,74	0,82
Mantenimiento IC	M USD	0,10	0,54	0,34
Vida útil	Años	30	30	30
Tasa de descuento	%	11,0%	11,0%	11,0%
Crecimiento OPEX	%	6%	6%	6%
Distancia anual	km	312.075,00	312.075,00	312.075,00

6.4.2 Emisiones de CO2:

- Factor de Emisión:

El factor de emisión para la tecnología Diesel fue establecido en 10,149 kg CO2 eq/ galón, de acuerdo con la calculadora de emisiones de la UPME, la cual se encuentra disponible en su página web.

Así mismo, para las tecnologías FCH y Catenaria, en las cuales fueron asumidas que están conectadas al Sistema Interconectado Nacional - SIN, el factor de emisiones fue calculado con base en lo aportado por parte de las redes eléctricas a partir del factor de emisiones del SIN para el usuario final, el cual según la calculadora de emisiones de la UPME es de 0,127 Ton CO₂eq/MWh. En ese sentido, considerando un factor de pérdidas para el Sistema de Transmisión Nacional de 2% y para el Sistema de Distribución Local de 6 %, se obtuvo un factor de emisiones a considerar para las redes eléctricas de 0,00942 Ton CO₂eq/MWh.

Así mismo, el diseño contempla un factor de capacidad de 95%, siendo este un valor que, de acuerdo con la revisión documental, hace sentido para tener un grado de competitividad elevado. Este factor de capacidad se asume que será obtenido a partir de contratos Power Purchase Agreement – PPA con plantas solares, que garanticen un suministro de electricidad constante que permita obtener una producción elevada de H₂.

- Consumo del Energético:

El consumo para la tecnología Diesel fue establecido en 580.459,50 galones al año, considerando un consumo promedio de 0,93 galones por km, de acuerdo con información de Cerrejón.

Así mismo para el consumo de electricidad de la Catenaria, esta fue definido en 22.902,14 MWh/año, el cual considero una disponibilidad del 95% del tren así como la potencia de 3,20 MW con un factor de utilización de 43% (Roland Berger, 2019).

Para FCH el valor calculado fue de 28.530,55 MWh/año el cual considero la potencial del electrolizador de 3,27 MW así un factor de capacidad del 95%

6.4.3 Km de vía de carga por tecnología

De acuerdo con reportes de la International Union of Railway, la longitud total de vías férreas en el mundo es de 1.140.941 km, de los cuales el 40% son dedicados al transporte de carga (IEA,2019), así mismo, el 70% de las vías férreas con

aplicaciones de carga son propulsados con Diesel (IEA, 2019). En ese sentido, teniendo en cuenta los actuales proyectos en circulación propulsados con FCH en Alemania por parte de Alstom, se asumió que el 0,5 % de las vías están con tecnología FCH y el restante 29,5 % por Catenaria, obteniendo con esto que para el Diesel se tiene un total de 456.376,40 km, seguido por Catenaria con 134.631,04 km y 2.281,88 para FCH.

6.4.4 Tiempo de operación

Haciendo uso de la revisión documental histórica, la tecnología de propulsión con Catenaria es la más antigua con un tiempo de operación de 144 años (Railway Technology, 2015), seguido por la tecnología Diesel-Eléctrica con 78 años (Railway Technology, 2015) y por último la FCH con 5 años de operación comercial (Alstom, 2023).

6.4.5 Nivel de Maduración

Teniendo en cuenta las condiciones actuales del mercado, fue establecido un nivel de maduración de 9 (el máximo) para la tecnología Diesel y Catenaria, en tanto que para la FCH de carga un valor de 5 (European Investment Bank. 2022)

6.5 RESULTADOS

A partir de los cálculos realizados con base en los criterios y la información expuesto en los capítulos anteriores, a continuación, se presentan los resultados obtenidos:

6.5.1 TCO

Tabla 6 Resultados del TCO

TECNOLOGIA	TCO [USD/km]
Diesel	\$18,51
FCH	\$23,54
Catenaria	\$24,43

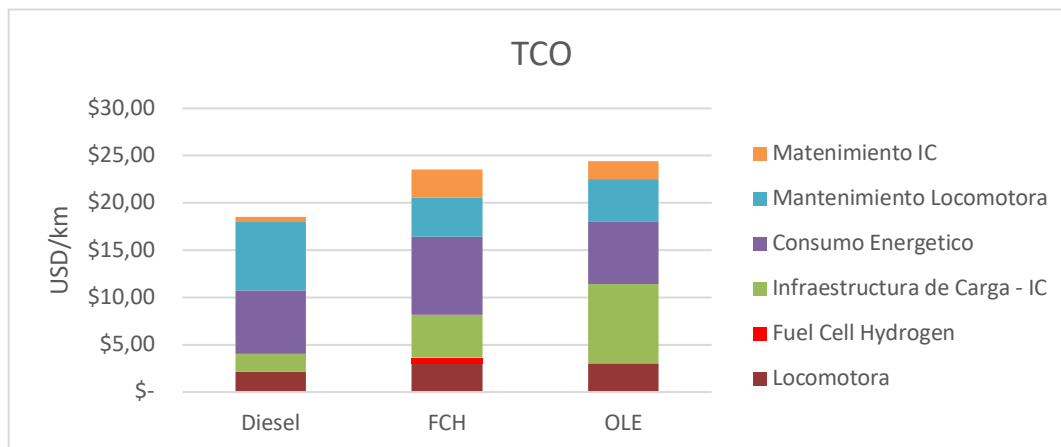


Figura 10 TCO discriminado por componente

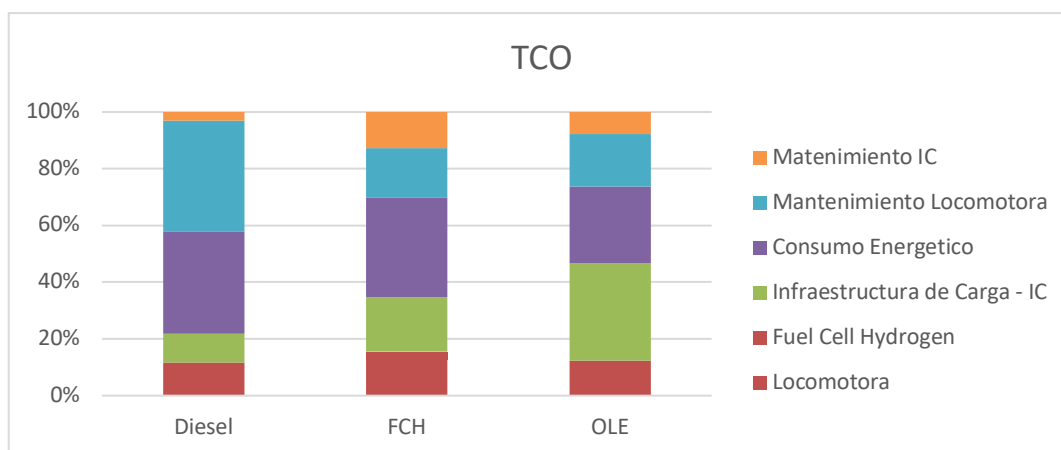


Figura 11 TCO discriminado por componente (%)

El TCO del FCH obtuvo un valor de 23,54 USD/km, el cual representa un 27% por encima del Diesel y un 3,7 % por debajo de Catenaria. La diferencia de 5,03 USD/km de más de la tecnología FCH es debido a los costos de la locomotora (incluido el Fuel Cell y los tanques de almacenamiento) y la infraestructura de recarga (Sistema HRS y Electrolizador), sin embargo, los costos más bajos del precio de la electricidad sumado a los bajos costos de mantenimiento asociado por la menor cantidad de partes móviles del Tren FCH apalancaron el equilibrar el valor final del TCO y por ende obtener una mayor competitividad.

En ese sentido, el precio del Diesel utilizado fue de 2,09 USD/galón, el cual es un precio promedio para un gran consumidor ubicado en la Costa Caribe, donde en su estructura de costos se tiene en cuenta el ingreso al productor más el IVA del 5% más el impuesto nacional más el impuesto al carbono – el cual es de 0,043 USD/galón – más el transporte por ductos y otros factores adicionales. Realizando la equivalencia de las unidades del precio del Diesel a USD/MWh da como resultado 62,76, siendo este un valor mayor a los estimados para el precio de la electricidad, establecido en 52,45 USD/MWh obtenido de la última subasta de largo plazo para energías renovables realizado por el Gobierno Nacional en el año 2021.

Así mismo, complementando el anterior análisis, los FCH tienen una eficiencia Tank to Wheel entre 36 a 45 %, comparado con el rango de 17 a 21 % que presentan los motores de combustión interna, el cual se explica en el caso de FCH, en la conversión del hidrógeno en electricidad y de la electricidad en energía mecánica, en tanto que, para el caso de los motores a combustión, su baja eficiencia es debido a pérdida de energía por calor (Deloitte, 2019). En términos globales, el tener precios menores de la electricidad y una mayor eficiencia de las FCH resultara en mejores rendimientos de cara a ser una opción competitiva para sustituir la tecnología Diesel.

Para analizar el impacto que tienen los altos costos asociados a la producción de Hidrógeno, se realizó un análisis de sensibilidad, disminuyendo el valor actual de 1800 USD/kW del Electrolizador a 600, los cuales son valores proyectados al 2025(IEA, 2019) y de igual manera el costo de la electricidad de 52,45 USD/MWh a 35 USD/MWh – siguiendo la senda de reducción de precios de acuerdo con el IRENA -, obteniendo valor de 18,33 USD/km, el cual es menor al TCO del Diesel. Este escenario proyectado crea condiciones de competitividad de la tecnología FCH en los años futuros para hacerle frente a la tecnología convencional Diesel.

Así mismo, la tecnología de Catenaria es otra opción medioambiental favorable, pero en este caso tiene un valor de TCO con incremento de 0,9 USD/km, argumentando en las

grandes inversiones que se deben realizar para desplegar el sistema de catenaria a pesar de que, en el área de operación de la vía férrea de Cerrejón, existe en sus cercanías, redes eléctricas propiedad de la empresa, lo cual podría ser revisado en mayor detalle con posteriores estudios.

Por otro lado, de acuerdo con las proyecciones realizadas por la UPME referentes al precio del Diesel para grandes consumidores, se tendrá un incremento sostenido en los próximos años (UPME, 2022) soportado principalmente en el precio internacional del crudo. Así mismo, de acuerdo con la Política Pública establecida por el actual Gobierno, la cual tiene posturas en contra de la industria extractivista, muy probablemente se tendrán escenarios de aumento de impuesto a los combustibles fósiles y sus derivados (como lo puede ser el impuesto al carbono, el cual hace parte de la estructura de costos del Diesel). Este panorama favorece la competitividad de la tecnología FCH ya que un aumento del 10% en el precio del Diesel, resultada en un TCO de 19,18 USD/km, es decir un aumento del 3,6%, lo cual aumentara aun la brecha en el escenario en el cual se tenga disminución en los costos de producción de Hidrogeno sumado a un aumento del costo del Diesel.

En síntesis, el TCO de la tecnología FCH es mayor a la tecnología Diesel en un escenario de caso base, a pesar de los bajos costos de mantenimiento comparados con el Diesel, sin embargo, existen escenarios que empiezan a favorecer la tecnología FCH siendo económica y competitivamente más viable en situaciones en las cuales convergen condiciones favorables para reducir los costos de producción de Hidrogeno, afectados directamente por un valor reducido de la electricidad (menores a 56 USD/MWh para efectos de referencia , Roland Berger, 2019) – proveniente de energías renovables como solar y eólica – así como un aumento en los precios del crudo y por ende del Diesel.

6.5.2 CAPEX:

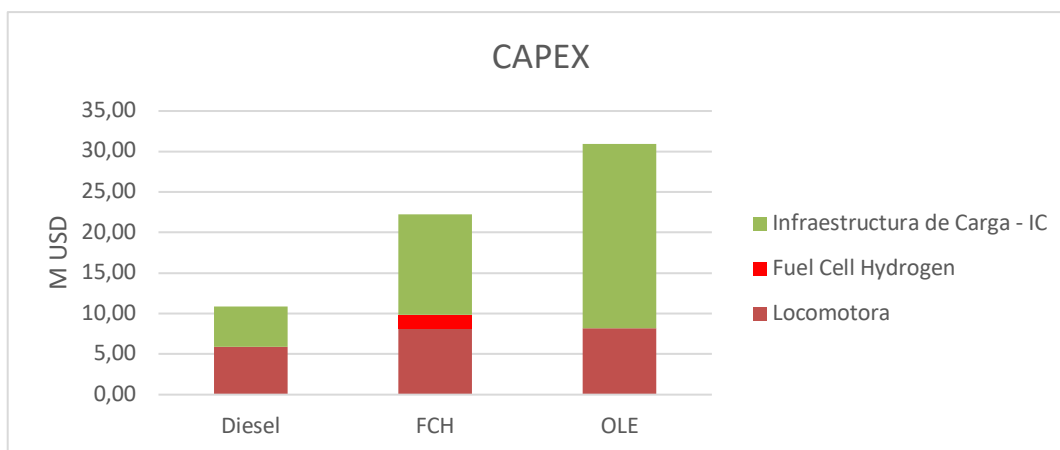


Figura 12 CAPEX discriminado por componentes

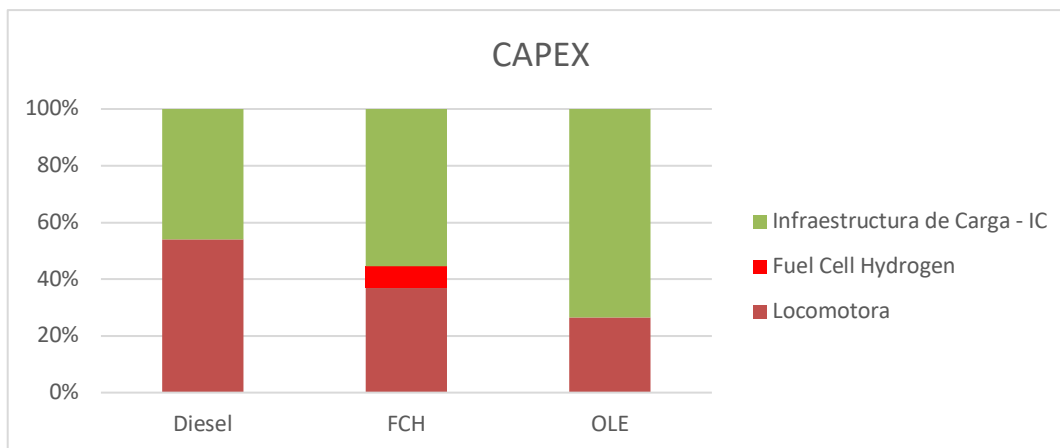


Figura 13 CAPEX discriminado por componentes (%)

Los resultados en el componente del CAPEX arrojaron que la tecnología FCH tiene un valor de inversión de 22,21 M USD, siendo 11,31 millones más que el Diesel y 8,69 millones menos que la Catenaria. La diferencia de más respecto al Diesel, tal y como fue expuesto en los segmentos anteriores, obedece a un mayor costo tanto de la Locomotora como de la Infraestructura de Carga.

Complementando el análisis expuesto en el capítulo de TCO, en donde el FCH es una alternativa factible económicamente para reemplazar a la tecnología Diesel en casos donde

los costos de producción de Hidrogeno son favorables (influenciados por bajos costos de electricidad. HRS y Electrolizador), hoy en día las Locomotoras FCH no están comercialmente disponibles en los mercados como si lo están las aplicaciones de pasajeros denominadas Multiple Units, estando el mercado de carga experimentando actualmente etapas de desarrollo tempranas como son los recientes anuncios realizados por la empresa Alstom en cooperación con Engie(Alstom, 2022) así como el operador ferroviario más grande de Australia (Aurizon) junto con la empresa minera Anglo American (Anglo American, 2021).

Este panorama muestra que, para lograr la reducción del CAPEX, se deben establecer estrategias relacionadas con proyectos de investigación y desarrollo que permitan generar confianza en la industria, romper barreras de acceso y ser competitivos antes los bajos costos logísticos que ofrece la tecnología Diesel en modos de transporte tanto férreos como por carretera (Roland Berger, 2019).

A continuación, se realiza un breve análisis con base en la revisión documental, de los principales factores para lograr la reducción de los costos de CAPEX:

- 6.6 Fuel Cell: el costo actual promedio es de USD 230/kW, el cual puede disminuir en los próximos años a valores de USD 180/kW a través del avance tecnológico, con el aumento de la actividad catalítica y la disminución del platino (el cual es uno de los componentes los costosos) y así mismo con economías de escala se podrían llegar a costos de USD 45/kW (IEA,2019).
- 6.7 HRS: existe actualmente una pluralidad de costos debido a requerimientos específicos de seguridad y permisos en cada País. Así mismo, los dos principales componentes que afectan el costo son el compresor (cerca del 60%) y el tanque de almacenamiento (IEA,2019).
- 6.8 Electrolizador: Actualmente el costo total de instalación está en el rango de USD 1400-1800/kW, correspondiendo el rango bajo a tecnologías Alcalinas y el superior a PEM, siendo el Stack el componente principal.

6.5.3 Emisiones de CO₂eq

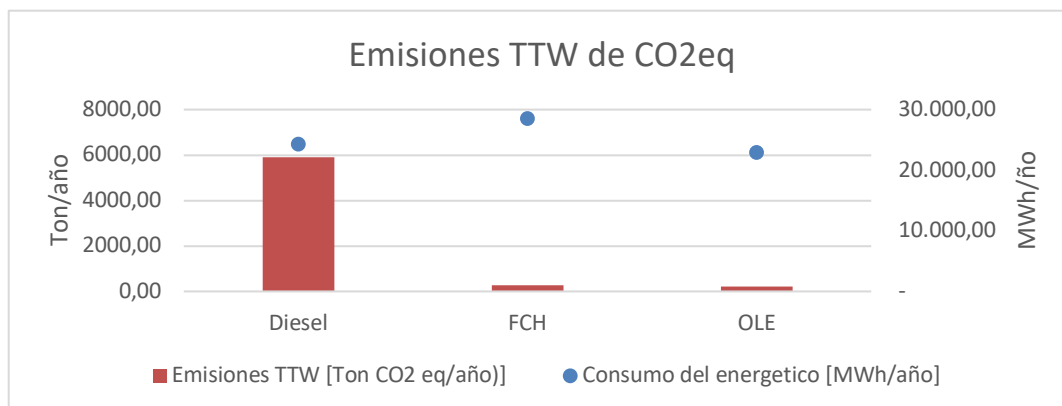


Figura 14 Emisiones vs Consumo

Las emisiones totales TTW de CO₂ eq de la FCH arrojaron como resultado 269 ton/año, siendo este valor un 95 % menor a las emisiones Diesel y 25% mayores a las de la tecnología con Catenaria. El menor es debido a que fue considerado como punto de partida inicial, el factor de emisiones del Sistema Interconectado Nacional, el cual, de acuerdo con información de la empresa Operadora y Administradora del SIN – XM, el 70% del componente de la matriz de generación es renovable (mayoritariamente a partir de recurso hídrico). Por otro lado, la tecnología FCH posee una eficiencia menor a la Catenaria, siendo estimada de acuerdo con la literatura en 48%, lo cual es reflejado en las menores emisiones por parte de esta última tecnología.

Se ratifica que la FCH es una tecnología de baja o ceros emisiones TTW dependiendo del origen de producción de la electricidad que alimentara al electrolizador. Por otro lado, para obtener valores competitivos de costos se requiere un alto factor de capacidad para el Electrolizador, el cual se puede lograr a través de interconexiones al SIN - donde hace sentido países como Colombia que posee el 70% de la matriz renovable - o con proyectos de dedicación exclusiva hidridos Solar – Eolica, Solar con baterías, Eolica con Baterías, los cuales no fueron tenidos en cuenta en este estudio, debido a su alto valor de inversión.

6.5.4 Costo de Abatimiento

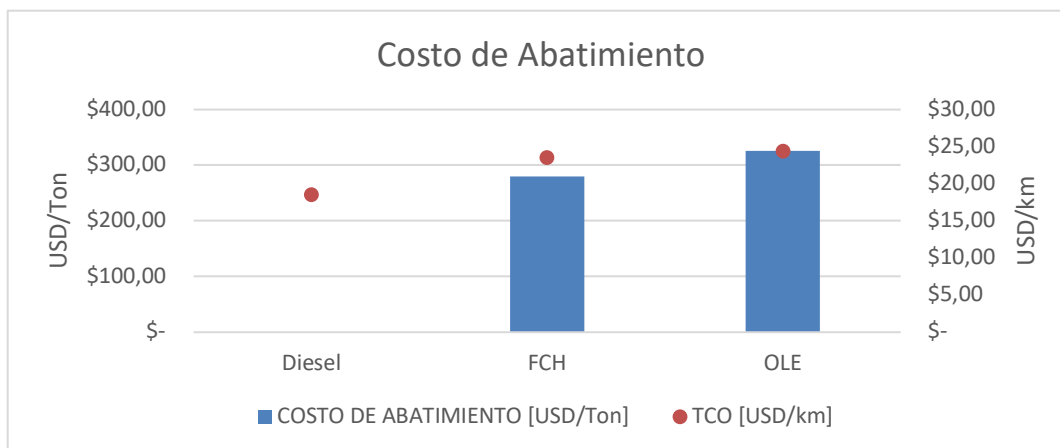


Figura 15 Costo de Abatimiento

Con los insumos calculados anteriormente de TCO y emisiones generadas, el Costo de Abatimiento para la tecnología FCH arrojó 279,43 USD/Ton en tanto que para Catenaria fue mayor al tener un costo de 325,96 USD/Ton. Los resultados de FCH permiten concluir que para abatir o reducir una tonelada de CO₂ respecto al caso base, se necesita invertir 279,43USD adicionales de reemplazar la tecnología Diesel por la de FCH, la cual es más competitiva que la Catenaria, debido principalmente al menor TCO. Así mismo, para abatir la totalidad de las emisiones producidas por la tecnología Diesel – 5.891,08 Ton/año – con la FCH, se necesitarían 1.6 M USD.

6.5.5 Tiempo de operación

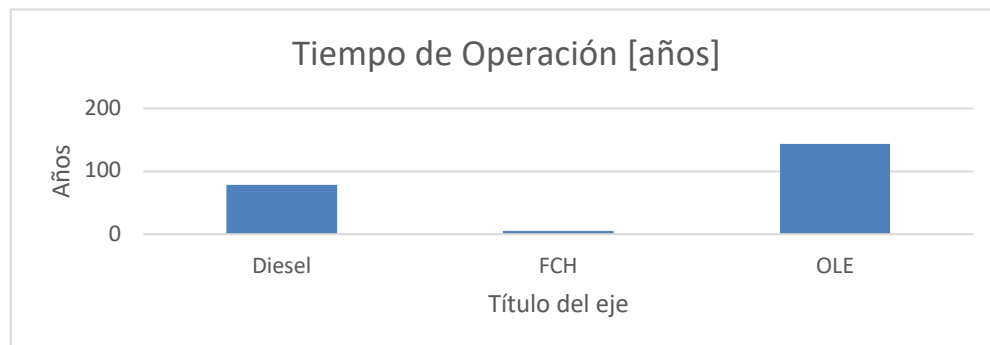


Figura 16 Tiempo de operación

En recuento histórico del funcionamiento de las Locomotoras inicia con la tecnología a Vapor hace más de 200 años, cuando el ingeniero Cornualles Richard Trevithic, mostro su invento ferroviario en la ciudad minera galesa de Merthyr Tydfil, realizando el primer viaje ferroviario el 21 de febrero de 1804 la cual revoluciono en su momento los modos de transporte. A partir de alli, los intentos de electrificación comenzaron a dar resultados hasta que en 1879 Alemania fue el centro de desarrollo de locomotoras eléctrica construyendo y operando el primer tren de pasajeros eléctrico demostrado por Werner Von Siemens, inventor y fundador de la empresa Siemens.

La invención del motor de encendido por compresión (o motor Diesel) provoco especulaciones en 1982 sobre como este método podría aplicarse a la propulsión ferroviaria, empezando su implementación en años posteriores. Hacia 1945 comenzó el auge de los motores Diesel-Eléctrico, posterior a la maduración de la tecnología Diesel, respondiendo a preocupaciones medioambientales que habían comenzado a surgir a finales del siglo 20(Railway Technology,2015).

Finalmente, hacia 2015, Alstom comenzó a desarrollar su propósito de Tren impulsado con hidrogeno para pasajeros, y no fue hasta el 2018 que inicio la fase de pruebas haciendo un cubrimiento de cerca de 180.000 km en total hasta el año 2022 en varias regiones de Alemania, con lo cual se dio inicio al primer tren impulsado con Hidrogeno de la historia (Alstom,2023).

El breve relato anterior, posiciona a la tecnología de electrificación por catenaria como la más antigua entre las 3, seguido por la propulsión con motores Diesel-Eléctrico y por último la propulsión del primer tres de Hidrogeno que se dio en el año 2018.

6.5.6 Km de vía de carga por tecnología

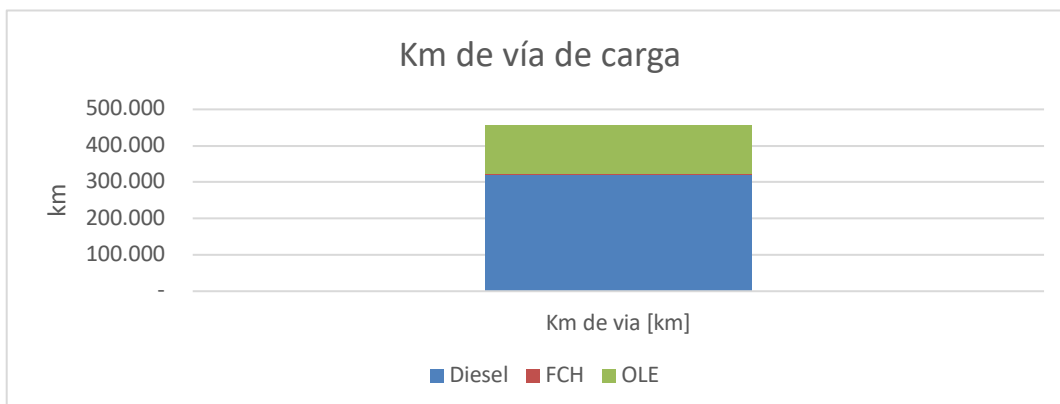


Figura 17 Km de vía por tecnología

Refrescando la información descrita en el capítulo 6.4.3, la distancia total de vía férrea en el mundo gira en torno a los 1.1 Millón de km - sumando transporte de carga y pasajeros, según la International Union of Railway. De ese número, según datos de la IEA, el 40 % pertenece a carga, y a su vez, el 70 % de la distancia total de vías férreas de carga son propulsadas mediante Diesel, lo cual da como resultado 319.464 km.

A si mismo, el restante 30 % esta propulsado por electricidad, de los cuales, de acuerdo con información de los fabricantes de FCH como Alstom, Siemens, Stadler etc, de los diferentes proyectos que están en curso, en 2282 km de vía férrea están circulando trenes propulsados con FCH. En ese sentido, alrededor de 134.631 km de vía férrea están destinado a la circulación de trenes propulsados a través de Catenaria.

Lo expuesto anteriormente, argumenta el hecho que la propulsión con Diesel es la tecnología incumbente, siendo por el momento la FCH una tecnología naciente que

se encuentra en fase de desarrollo, siendo una alternativa para la descarbonización de la industria de trenes de carga.

6.5.7 Nivel de Maduración

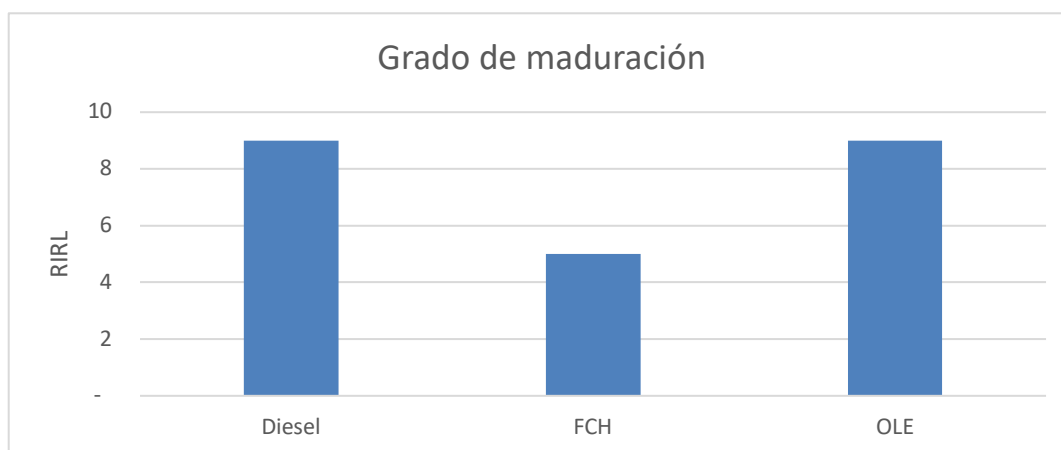


Figura 18 Nivel de Maduración

De acuerdo con la clasificación de madurez tecnología definido por el European Investment Bank especialmente para la industria Ferroviaria (European Investment Bank, 2022), el mayor grado lo obtuvo las locomotoras Diesel, seguido por la eléctrica a partir de catenaria y por último la FCH.

Las razones de estos resultados son consecuencia de lo expuesto en las dos secciones anteriores, para lo cual, la propulsión con Diesel presenta el mayor tiempo de operación así como ha recorrido las mayores distancias. No obstante, el interés que ha despertado en latitudes como Europa la descarbonización de los trenes propulsados con Diesel ha suscitado el desarrollo de proyectos en Alemania, Francia, Escocia, Italia, Portugal etc (UIC, 2021) que sentaran las bases para madurar la tecnología y hacer que sea costo eficiente.

6.5.8 Resultados matriz multicriterio

Los siguientes son los resultados obtenidos de aplicar la matriz multicriterio, la cual utilizo como insumo, la información de las variables calculadas a partir de los parámetros económicos, ambientales, tecnológicos y de mercado definidos, así como los diferentes

escenarios establecidos para el análisis de sensibilidad. Tabla 7 Resultados de la Matriz Multicriterio

Numero	Escenario	Diesel	FCH	Catenaria
1	Escenario Igual distribución por componente	0,62	0,53	0,84
2	Escenario balanceado con prioridad en Económicos	0,63	0,58	0,80
3	Escenario balanceado con prioridad en Ambiental	0,50	0,59	0,87
4	Escenario balanceado con prioridad en Mercado	0,69	0,54	0,87
5	Escenario balanceado con prioridad en Económico y Ambiental	0,35	0,78	0,83

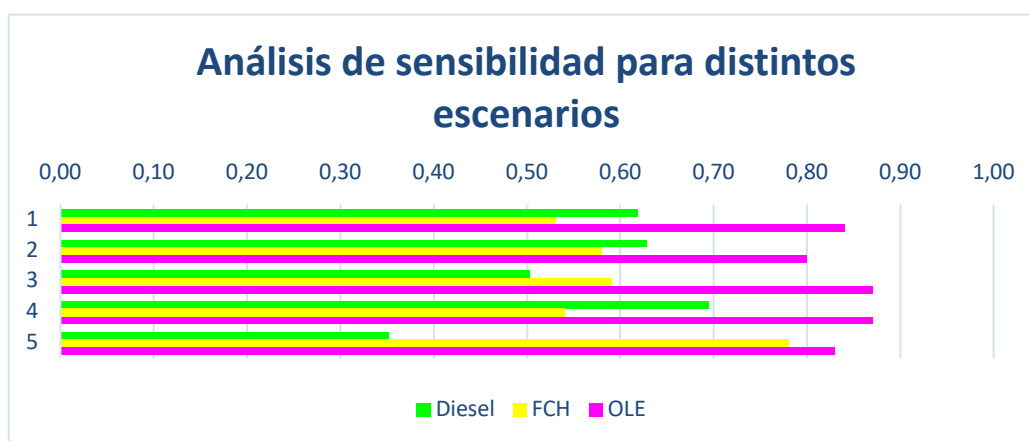


Figura 19 Análisis de Sensibilidad para distintos escenarios

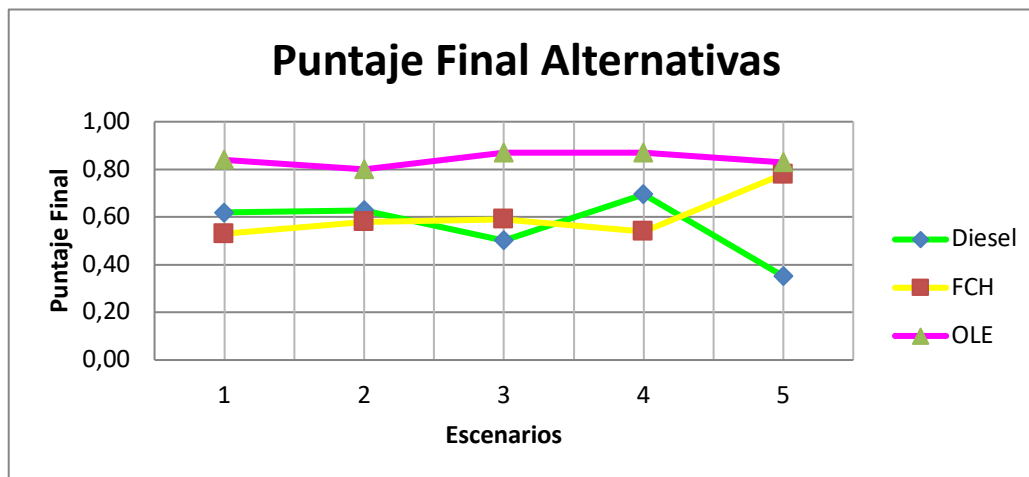


Figura 20 Puntaje Final de Alternativas

Los anteriores resultados muestran una tendencia de la tecnología que estará en capacidad de sustituir la propulsión con Diesel en el transporte de carga en Colombia, evaluando para este estudio dos tecnologías con bajas emisiones: la primera es la electrificación con Catenaria, la cual como se vio en secciones anteriores, tiene un alto grado de maduración en el mercado, estando en operación hace unas décadas y por otro lado, una opción que esta asomando en los últimos años y la cual ha tenido grandes repercusiones a nivel mundial, la cual es la Fuel Cell Hydrogen.

En ese sentido, el propósito del estudio fue el de evaluar la factibilidad de impulsar y promover la tracción de locomotoras destinadas al transporte de carga con hidrogeno producido a partir de energías renovables, siendo esta comparada con el caso base o business usual y otra alternativa de bajas emisiones.

Esta comparación no solo se basó en analizar parámetros específicos con temáticas definidas, si no en establecer resultados desde diferentes ópticas, que pueden ser representadas por entidades de Gobierno, autoridades ambientales, inversionistas, fabricantes etc, siendo varios de estos representando a través de los 5 escenarios que fueron propuestos. Es por esto que la calificación que se obtuvo de cada uno de estos 5 escenarios

nos debe dar un panorama de la valoración de las alternativas, la cual puede ayudar a soportar decisiones para avanzar en etapas posteriores del desarrollo de los proyectos.

Haciendo el recuento de los puntajes obtenidos para los 5 escenarios (prioridad en Económico y Ambiental), en el escenario # 5, la FCH obtuvo una calificación cercana a la otra alternativa de descarbonización que es la Catenaria (0.05 puntos por debajo), argumentando en los siguientes hechos:

- El TCO de la FCH fue de 23,54 USD/km versus 24,43 USD/km de la Catenaria, lo cual representa un 0,89 USD/km menos.
- El CAPEX de la FCH fue de 22,21 M USD versus los 30,91 M USD de la Catenaria, lo cual representa 8,69 M USD por debajo.
- El costo de abatimiento de la FCH fue de 279,43 USD versus los 325,96 USD de la Catenaria, lo cual representa un 16 % de más, debido a que presenta emisiones superiores a la Catenaria por tener un mayor consumo de electricidad (menor eficiencia).
- Las Emisiones de CO₂ eq de la FCH fueron de 269 Toneladas versus los 215,93 Toneladas de Catenaria, lo cual representa un 24 % más, debido a un mayor consumo de electricidad por parte de la FCH (menor eficiencia)

Por otro lado, en los 4 primeros escenarios planteados, la FCH obtuvo puntajes por debajo de la Catenaria debido principalmente a las variables que midieron aspectos tecnológicos y de mercado, donde esta última tecnología tiene un tiempo de maduración y desarrollo muy por encima de la tecnología naciente FCH.

Así mismo, es relevante indicar los siguientes detalles respecto a la tecnología FCH:

- El TCO actual está un 27% por encima de la tecnología Business as Usual, debido principalmente a la Locomotora y a la infraestructura de carga, donde la primera presenta un aumento de 67,7 % y la segunda un 147% por encima.

- El análisis de sensibilidad realizado, indica que con un costo de electricidad de 35 USD/MWh (hoy considerado en 52,45 USD/MWh) y un costo del electrolizador de 600 USD/kW (hoy considerado en 1800 USD/kW) resulta en un TCO menor de 18,33 USD/km versus un TCO actual de 18,51 USD/km. Estos dos valores son el punto de inflexión donde comienza a hacer más competitivo el FCH.
- La tendencia actual tanto a nivel global como nacional (desarrollado en el capítulo de resultados de TCO), indica un aumento progresivo en el precio del Diesel, soportado en el incremento del precio del crudo así como Políticas de Gobierno para desincentivar las emisiones de GEI causada por las industrias extractivistas. Este escenario favorece la competitividad del FCH ya que un aumento del 10% en el precio del galón Diesel (hoy considerado en 2,09 USD/Galón) representa un aumento de 3,6 % en el TCO, obteniendo un valor de 19,18 USD/km (versus 18,51 USD/km con el escenario actual).
- El Nivel de Maduración actual de la FCH es de 5, lo cual indica que esta en etapa de prototipo, comparado con una maduración completa que presentan las tecnologías Diesel y Catenaria. Esto representa un reto en desarrollo de proyectos de inversión y desarrollo que apalanquen la evolución de la FCH.

Finalmente se recomienda que uno de los pasos a seguir para robustecer en siguientes etapas al presente estudio sea incorporar un análisis prospectivo a 2030-2050 bajo escenarios de incremento de costos e impuestos para combustibles fósiles y reducción de costos en la tecnología y la electricidad renovable para FCH, con el fin de identificar el tiempo donde el sistema propulsado por H₂ tiende a ser más competitivo.

Capítulo 7

CONCLUSIONES

Las siguientes son las principales conclusiones obtenidas a partir del desarrollo del presente estudio, las cuales hacen un barrido por las diferentes secciones y temáticas abordadas:

- El estudio tuvo como propósito, evaluar la factibilidad de implementar la tecnología FCH como alternativa de descarbonización al Diesel, para la propulsión de un Sistema Ferroviario de carga, tomando como caso de estudio el corredor de la empresa Cerrejón.
- Hoy en día, para el análisis planteado, el TCO favorece a la tecnología incumbente, la cual es Diesel – a pesar de los bajos costos del mantenimiento - , sin embargo, empiezan a aparecer escenarios favorables para viabilizar el reemplazo hacia tecnologías que aporten a la descarbonización como es la FCH, la cual según los resultados obtenidos, con precios de electricidad por debajo de 35 USD/MW y costo de electrolizadores por debajo de 600 USD/kW se logra una mayor competitividad que el Diesel. Este escenario planteado corresponde a casos para los cuales se tienen costos favorables para producir el Hidrogeno.
- Con la implementación de la tecnología FCH, se logrará una reducción del 95% en las emisiones Tank to Wheel de CO₂ eq comparado con el Diesel, para el escenario de obtener un factor de capacidad del electrolizador del 95%, el cual en términos conceptuales se obtuvo considerando un PPA con conexión al Sistema Interconectado Nacional.
- La maduración de la tecnología FCH para el transporte de carga -no disponibles comercialmente hoy en día -, requerirá esfuerzos de inversión en proyectos de Investigación y Desarrollo, que ayuden a generar confianza en el mercado, eliminar barreras de acceso y desbloquear su potencial.
- Una sustitución del 50 % del transporte de carga via terrestre con vehículos pesados por modo férreo de bajas emisiones - como FCH -, ayudara a la disminución del 4.172,57 Gg de CO₂ eq, pasando de una participación actual de 28% al 16%.

- Se recomienda que la siguiente etapa de este estudio incorpore escenarios prospectivos con el propósito de identificar en que momento la tecnología FCH será mas favorable que las tecnologías convencionales. Eso deberá abarcar un análisis de proyección de costos e indicadores macroeconómicos.

REFERENCIAS

- [1] Fenalco, Andi, Informe de Vehículos de Carga a mayo 2021, 2021.
- [2] J. P. Escobar, D. L. Rodriguez, Análisis de prefactibilidad para la reconstrucción de la vía férrea que comunica el Municipio de el Espinal (Tolima) con Neiva (Huila), Colombia, 2017.
- [3] Gef, IDEAM, Fundación Natura, PNUD, Informe del Inventario Nacional de Gases Efecto Invernadero 1990-2018 y Carbono Negro 2010-2018 de Colombia, 2022.
- [4] Cerrejón, Información General de las Operaciones de Cerrejón, 2012.
- [5] Shift2Rail, FCH, Roland Berger, Study on the use of fuel cells and hydrogen in the railway environment.
- [6] International Energy Agency, Global Hydrogen Review 2022, 2022.
- [7] International Energy Agency, International Union of Railway, Railway Handbook 2017, 2017.
- [8] International Union of Railway, Hydrogen Trains – Best Practice Workshop, 2021.
- [9] Cerrejón, Informe de Sostenibilidad 2022, 2022.
- [10] Departamento Nacional de Planeación, Mesa Ferroviaria, Colombia, 2022
- [11] Ministerio de Transporte, Plan Maestro Ferroviario, Colombia, 2020.
- [12] Unidad de Planeación Minero Energético, Proyección de precios de los energéticos en fuente de producción y en plantas de generación enero 2022 – diciembre 2037, 2022.
- [13] European Investment Bank, Technical report on railway traction technologies, 2022
- [14] F. Zenith, R. Isaac, A. Hoffrichter, M. S. Thomassen, S. Moller-Holst, Techno-economic analysis of freight railway electrification by overhead line, hydrogen and batteries: Case studies in Norway and USA.
- [15] International Energy Agency, The future of Hydrogen, 2019.

- [16] International Energy Agency, The future of rail – Opportunities for energy and the environment, 2019.
- [17] Deloitte, Fueling the Future of Mobility Hydrogen and fuel cell solutions for Transportation, Volume 1, 2019.
- [18] Rodrigue, J.P. The Geography of Transport Systems, 2020.
- [19] CEPAL, Situación actual de los metros y ferrocarriles de América Latina, 2013.
- [20] CAF, «CAF,» 01 06 2022. [En línea]. Available: <https://www.caf.net/es/sala-prensa/nota-prensa-detalle.php?e=380>. [Último acceso: 22 06 2023].
- [21] Alstom, «Coradia Ilint,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.alstom.com/solutions/rolling-stock/alstom-coradia-ilint-worlds-1st-hydrogen-powered-passenger-train>. [Último acceso: 01 06 2022].
- [22] Railway Technology, «Railway Technology,» 18 02 2022. [En línea]. Available: <https://www.railway-technology.com/news/japan-railway-hydrogen-train/>. [Último acceso: 02 06 2023].
- [23] Greem Car Congress, «Energy, technologies, issues and policies for sustainable mobility,» 02 11 2021. [En línea]. Available: <https://www.greencarcongress.com/2021/11/20211102-chinah2loco.html>. [Último acceso: 05 06 2023].
- [24] Carbones el Cerrejon, «Carbones el Cerrejon,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.cerrejon.com/nosotros/historia>. [Último acceso: 01 06 2023].
- [25] Railway Technology, 19 05 2015. [En línea]. Available: <https://www.railway-technology.com/features/featuretracks-in-time-200-years-of-locomotive-technology-4517022/>. [Último acceso: 01 06 2023].
- [26] Alstom, 06 04 2022. [En línea]. Available: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2022/4/alstom-and-engie-sign-partnership-supply-fuel-cell-system-renewable>. [Último acceso: 01 06 2023].