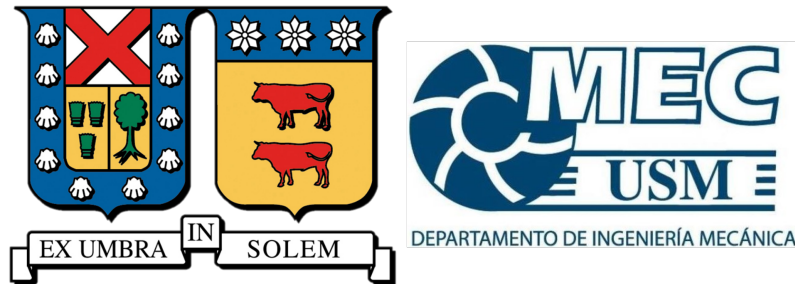


UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA
CASA CENTRAL



Evaluación del Impacto de la Tecnología
Productora de Oxihidrógeno en la
Disminución del Consumo de
Combustible en Equipos de una
Empresa Forestal

Memoria Para Optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico

Memorista: Felipe Arumí Aguilar
PROFESOR GUÍA: Dr. Ing. Germán Amador Diaz
PROFESOR CORREFERENTE: Dr. Ing. Roberto Leiva Illanes
DEPARTAMENTO: Ingeniería Mecánica.

18 de agosto de 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título; Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Evaluación del Impacto de la Tecnología Productora de Oxihidrógeno en la Disminución del Consumo de Combustible en Equipos de una Empresa Forestal

Nombre del candidato(a): Felipe Arumi Aguilar

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Mecánica

Campus: Casa Central Valparaíso ; **Departamento:** Ingeniería Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, German Amador, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses; 12 meses; 2 años; 3 años; 5 años; 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 25-08-2025

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 18-08-2025

Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Resumen

En este trabajo se evalúa el impacto de una tecnología productora de oxihidrógeno (HHO) en la disminución del consumo de combustible en los equipos de una empresa forestal. Para ello, se implementó una herramienta de Machine Learning denominada K-means, la cual permite agrupar la información operacional de las máquinas en clústeres o grupos de condiciones similares, definiendo así los distintos modos de operación.

La información analizada provino de los informes de rendimiento semanal de cuatro vehículos pertenecientes al Departamento de Transporte de la Empresa. Para cada vehículo, se definieron los modos de operación correspondientes a la línea base (sin HHO), a partir de 27 semanas de datos. Posteriormente, durante el periodo de evaluación con HHO (19 semanas), cada informe fue clasificado en su respectivo modo de operación, permitiendo así realizar una comparación bajo condiciones operativas equivalentes. Como resultado, se observó que en dos de los vehículos evaluados se obtuvo un ahorro de combustible promedio del 4,44 [%] con un intervalo de confianza del 0,5[%], mientras que en los otros dos vehículos se alcanzó un ahorro del 5,16[%], con un intervalo de confianza del 5,84[%]. Esta diferencia es reflejo de como el ahorro de combustible es altamente sensible a los modos de operación y a las condiciones del vehículo. Debido a esta variación, se decidió utilizar el promedio de los dos primeros vehículos como el resultado final.

Adicionalmente, se evaluó la factibilidad de implementar esta tecnología en otros departamentos de la empresa, en particular en el área de caminos, dado a que presentan vehículos similares en configuración y operación. Para esto, se analizó la factibilidad técnica, donde se comparó el trabajo realizado en la instalación de la tecnología con la entregada por los proveedores, y se evaluó el estado en quedaron los equipos de electrólisis después de un año de operación, destacando que en los dos vehículos que presentaron un intervalo de confianza alto, la tecnología quedó con daños irreparables, producto de la agresividad de las operaciones.

Por la parte económica, se evaluó un proyecto de implementación de esta tecnología en 25 vehículos del departamento de transporte y 25 vehículos del departamento de caminos, lo que dio una rentabilidad nula, al entregar un VAN negativo y un TIR menor a la tasa de descuento considerada. Esto debido a que los vehículos de caminos si bien similares en su configuración y operación, presentan un consumo de combustible promedio menor que los vehículos de transporte, por lo que el beneficio asociado al ahorro de combustible es marginal.

Evaluando el proyecto solo con una flota de vehículos de transporte, resulta rentable con un VAN de 42.500 [USD] (con una tasa de descuento del 10 [%]), un TIR de 15 [%] y un Payback de casi 5 años. Esto es altamente sensible al precio del combustible y al costo adicional del mantenimiento, por lo que se revisan formas de mitigar esto.

Para concluir, si bien los resultados son positivos, se destaca que la metodología de medición no fue la acertada, dado a una cantidad importante de variables que no se consideraron, se considera que estas pruebas son inconclusas.

Agradecimientos

Agradezco a mis padres, José Luis Arumí y Ana María Aguilar por apoyarme y guiarme en todas las decisiones importantes de mi vida.

Agradezco a mi grupo de amigos de la universidad, quienes me apoyaron en un nivel académico y personal en estos años.

Agradezco a mis profesores, por ser mis guías en este periodo de mi vida, en particular al Dr. Ing. Germán Amador, por darme el apoyo y conocimientos necesarios para finalizar esta aventura.

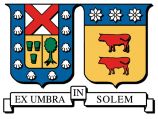
Agradezco a la empresa Arauco, en particular a Guillermo Olmedo e Iván Luengo por darme la oportunidad de participar en este proyecto.

Agradezco a mi Abuela, que en paz descanse, por recibirme en esta región en los primeros dos años de la universidad, permitiendo así que la transición de escolar a universitario fuera más liviana

Por último, pero no por eso menos importante, agradezco a mi novia y mejor amiga, Daniela González, quien ha sido una inspiración, un apoyo y por sobre todo mi cable a tierra, protegiéndome de mis ideas más alocadas.

Índice

Resumen	1
Nomenclatura	7
1 Introducción	8
1.1 Motivación	8
1.2 Antecedentes	8
1.3 Objetivos	10
1.3.1 General	10
1.3.2 Específicos	10
2 Marco Teórico	11
2.1 Combustibles Fósiles	11
2.1.1 Tipos de Combustibles Fósiles	11
2.1.2 Desafíos Asociados al uso de Combustibles Fósiles	13
2.2 Motores de Combustión Interna	15
2.2.1 Funcionamiento	16
2.2.2 Problemas asociados con los motores de combustión interna	17
2.3 Oxihidrógeno	18
2.3.1 Uso de Oxihidrógeno en Motores de Combustión Interna	21
3 Estado del arte	24
3.1 Investigaciones del uso del Oxihidrógeno en Motores de Combustión Interna	24
3.2 Caracterización consumo de combustible en terreno	29
4 Metodología	31
4.1 Determinar el consumo de combustible de los equipos seleccionados en función de las condiciones operacionales	31
4.1.1 Equipos e Instrumentos	31
4.1.2 Definición de las Condiciones Operacionales Características	34
4.2 Medir la Diferencia del Consumo de Combustible de los Mismos Equipos tras la Intervención del Oxihidrógeno	38
4.2.1 Equipos e Instrumentos	38
4.2.2 Medir la Diferencia del consumo de combustible	42
4.3 Evaluar la Factibilidad de Implementar esta Tecnología en otras Áreas de la Empresa	43
4.3.1 Factibilidad Técnica	43
4.3.2 Factibilidad Económica	44
5 Resultados	45
5.1 Determinar el consumo de combustible de los equipos seleccionados en función de las condiciones operacionales	45
5.2 Medir la Diferencia del Consumo de Combustible de los Mismos Equipos tras la Intervención del Oxihidrógeno	50
5.3 Evaluar la factibilidad de implementar esta tecnología en otras áreas de la empresa	53
5.3.1 Factibilidad Técnica	53
5.3.2 Factibilidad Económica	56



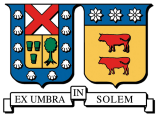
6 Conclusiones	60
Referencias	63

Índice de tablas

1	Resultados del análisis realizado por la empresa comercializadora	9
2	Variaciones Porcentuales con Datos Diarios	9
3	Variaciones Porcentuales con Datos Semanales	10
4	Tipos de Carbón	11
5	Derivados del petróleo y sus características principales	13
6	Balances térmicos combustibles más utilizados	14
7	Comparación de las propiedades del Hidrógeno y otros combustibles	22
8	Motor utilizado por Babu, J et al	25
9	Motor utilizado por Elgarhi, I et al	25
10	Motor utilizado por Sabeghi et al	26
11	Motor utilizado en el experimento de Trujillo-Olivares, I et al	27
12	Motor utilizado en el experimento de Wang, M, et al	27
13	Motor utilizado en el experimento de Guan, M et al	28
14	Ficha técnica camiones intervenidos	31
15	Variables entregadas por el sistema de telemetría	33
16	Ficha técnica equipos de electrólisis	38
17	Componentes externos del equipo	40
18	Componentes internos del equipo	41
19	Diferencias en el consumo de combustible del camión Chillán 1	51
20	Diferencias en el consumo de combustible del camión Chillán 2	52
21	Diferencias en el camión Arauco 1	52
22	Diferencias en el camión Arauco 2	52

Índice de figuras

1	Esquema de separación del petróleo	12
2	Consumo de combustibles fósiles global	14
3	Ciclo de trabajo de 4 tiempos	16
4	Esquemas de distribución de energía y trabajo de un motor	18
5	Reformado de Metano por Vapor	19
6	Tipos de electrolizadores	20
7	Esquema de la instalación de Babu,J et al	24
8	Instalación de Elgarhi, I	25
9	Resumen del experimento de Sabeghi et al	26
10	Instalación de Trujillo-Olivares, I et al	26
11	Instalación de Wang, M, et al	27
12	Instalación de Guan, M et al	28
13	Características físicas de los camiones	32
14	Imagen de los camiones estudiados.	32
15	Ejemplo método del codo	35
16	Ejemplo KMEANS	36
17	Diagrama de flujo código PCA	37
18	Diagrama de flujo código KMEANS	37
19	Circuitos de conexión del equipo de electrólisis	39
20	Exterior del equipo	40
21	Interior del equipo	41
22	Diagrama de flujo código KMEANS 2	42
23	Maqueta virtual de la instalación indicada por el proveedor.	43
24	Resultados algoritmo KMEANS en la línea base de los vehículos sector Chillán	46
25	Resultados algoritmo KMEANS en la línea base de los vehículos sector Arauco	47
26	Asignación de datos línea HHO a los modos de operación de los vehículos sector Chillán	50
27	Asignación de datos línea HHO a los modos de operación de los vehículos sector Arauco	51
28	Escudo protector de cabina	53
29	Esquema de instalación realizada en la prueba	54
30	Esquema de instalación para camiones tolvas	54
31	Daños presentes en equipo instalado en vehículo sector Chillán	55
32	Daños presentes en los equipos instalados en sector Arauco	55
33	Flujo de caja	56
34	Flujo de caja del proyecto reformulado	57
35	Sensibilidad del TIR al precio del combustible	57
36	Sensibilidad del TIR al costo agregado de mantenimiento	58
37	Sensibilidad del TIR al ahorro de combustible	58
38	Sensibilidad del TIR al precio del equipo de electrólisis	59



Nomenclatura

GEI: Gases de efecto invernadero.

HHO: Oxihidrógeno.

HHV: High Heating Value/Poder Calorífico Superior.

LHV: Low Heating Value/Poder Calorífico Inferior.

CO_2 : Dióxido de Carbono.

CO: Monóxido de Carbono.

O_2 : Oxígeno.

NO_x : Oxidos de Nitrogeno.

SMR: Reformado de Metano por Vapor.

H_2O : Molécula de Agua.

H_2 : Molécula de Hidrógeno.

KOH: Hidróxido de Potasio.

NaOH: Hidróxido de Sodio.

SFC: Consumo Específico de Combustible.

η_t : Eficiencia Térmica.

$\dot{m}_{combustible}$: Flujo másico de combustible.

P_{salida} : Potencia útil generada por el motor.

HC: Hidrocarburos.

PPM: Material Particulado.

PCA: Análisis de Componentes Principales.

VAN: Valor Actual Neto.

TIR: Tasa Interna de Retorno.

Payback: Periodo de Recuperación.

$LCO_{original}$: Costo nivelado original del vehículo.

LCO_{HHO} : Costo nivelado del vehículo tras instalar la tecnología de oxihidrógeno.

1. Introducción

1.1. Motivación

En el panorama empresarial global, la sostenibilidad y la sustentabilidad se han convertido en pilares fundamentales para el éxito a largo plazo. En este contexto, la Empresa Arauco S.A. emerge como ejemplo ante las empresas nacionales e internacionales, siendo la primera empresa forestal en el mundo en lograr un certificado de carbono neutralidad en su operación [1]. Este logro ha sido el resultado de la “Estrategia de Sustentabilidad” de la empresa, cuyo propósito es “Desde la naturaleza y lo renovable contribuimos a las personas y al planeta” [1].

La estrategia de Arauco se centra en implementar múltiples acciones orientadas en la reducción y/o captura de gases de efecto invernadero (GEI). Algunos ejemplos concretos de esto incluyen la generación de energía interna mediante hornos de biomasa creada en sus propias instalaciones, aprovechando el sub-producto del proceso de producción de celulosa, y la captura de carbono a gran escala mediante la gestión de sus bosques [1].

A pesar de estos avances, la Empresa continúa buscando nuevas formas de reducir su huella de carbono, y por consecuencia su dependencia de los combustibles fósiles, al ser parte de su compromiso de mitigación al cambio climático [1]. En línea de este objetivo, Arauco ha decidido evaluar el impacto que tendría la incorporación de oxihidrógeno (**HHO**) como aditivo en los motores de combustión interna utilizado en sus operaciones forestales.

El foco principal de esta investigación es analizar el efecto del HHO en la reducción del consumo de combustible en sus equipos móviles, particularmente en sus camiones de carga pesada. Para ello, se emplearon electrolizadores comerciales capaces de producir HHO gaseoso a partir de agua destilada, utilizando el sistema eléctrico propio de los vehículos.

Este trabajo busca aportar con evidencia técnica la toma de decisiones en el desarrollo de futuras estrategias de descarbonización y eficiencia energética dentro de la empresa, en el marco actual de su compromiso con la sustentabilidad empresarial.

1.2. Antecedentes

Esta investigación inició con una prueba realizada en cuatro camiones del Área de Transporte de la Empresa, a los cuales se les instaló un electrolizador a cada uno. Estos vehículos se ubicaron en dos comunas que representan los recorridos típicos en que circulan los activos de este departamento, siendo la comuna de Chillán y la comuna de Arauco (dos camiones por comuna). Las rutas ubicadas en la comuna de Chillán son caracterizadas por ser de pendiente baja y pavimentadas, mientras que las rutas de la comuna de Arauco pueden ser pavimentadas o forestales más empinadas.

Esta primera prueba fue realizada durante el 2023, donde el análisis fue realizado por la empresa que comercializa la tecnología, donde calcularon el “consumo base” (Consumo promedio de combustible sin oxihidrógeno) de cada vehículo a partir de datos semanales obtenidos desde noviembre del 2022 hasta mediados de abril del 2023, los cuales fueron contrastados con el consumo de combustible de los mismos vehículos después de ser intervenidos con la tecnología de electrólisis, mediante datos semanales obtenidos desde la segunda mitad de abril del 2023 hasta julio del mismo año.

De este estudio, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 1: Resultados del análisis realizado por la empresa comercializadora

Camión	Consumo Base [L/100km]	Consumo con HHO normalizado [L/100km]	Variación de consumo [%]
Chillán 1	41,4	36,7	-11,4 %
Chillán 2	43,3	41,6	-3,8 %
Promedio Chillán	42,3	39,1	-7,8 %
Arauco 1	45,7	43,1	-5,7 %
Arauco 2	48,4	44,1	-8,9 %
Promedio Arauco	47,1	43,6	-7,3 %
Promedio total	44,7	41,4	-7,4 %

Con los resultados obtenidos, la Empresa Arauco decidió realizar un análisis interno, tanto para evaluar el trabajo realizado por la empresa comercializadora, y para corroborar los resultados obtenidos. Este segundo análisis inicio durante una practica realizada en los meses de enero y febrero del 2024, donde se presento el proyecto al autor de este informe, con el objetivo de revisar los resultados del análisis original y desarrollar una iteración independiente del estudio.

Del trabajo realizado por la empresa comercializadora lo que más se destacó fue que la normalización del consumo de combustible con la inyección de HHO fue realizada por aproximaciones genéricas, basadas en camiones de transporte forestal Norte Americanos, lo cual disminuye la robustez de los resultados.

El segundo análisis realizado en la practica se enfocó en crear modelos lineales del consumo de combustible según la velocidad promedio del recorrido. Se crearon modelos a partir de los mismos datos del “consumo base”, y se contrastaron con una muestra más grande de recorridos realizados con la inyección de HHO, utilizando datos semanales y diarios, medidos desde la segunda mitad de abril del 2023 hasta agosto del mismo año.

Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 2 y 3

Tabla 2: Variaciones Porcentuales con Datos Diarios

Camión	Consumo Medio [L/100km]	Consumo Según Modelo [L/100km]	Variación [%]
Chillán 1	38,81	40,84	-4,96
Chillán 2	39,92	43,87	-9
Arauco 1	46,53	46,00	1,17
Arauco 2	45,34	47,65	-5,68
		Media Chillán	-6,98
		Media Arauco	-2,255
		Media Total	-4,6

Tabla 3: Variaciones Porcentuales con Datos Semanales

Camión	Consumo Medio [L/100km]	Consumo Según Modelo [L/100km]	Variación [%]
Chillán 1	39,04	40,91	-4,57
Chillán 2	41,29	43,37	-4,79
Arauco 1	44,41	45,64	-2,68
Arauco 2	45,17	47,42	-4,74
		Media Chillán	-4,68
		Media Arauco	-3,71
		Media Total	-4,2

Si bien esta metodología es más precisa que la utilizada por la empresa comercializadora, reflejándose en resultados más realistas, por la limitación temporal de la práctica, no se pudo concretar resultados definitivos, al no tener la oportunidad de hacer un seguimiento de las actividades realizadas con el oxihidrógeno a nivel operacional, es decir, con los usuarios que utilizaron los equipos de electrólisis en las pruebas. Además se considero que los modelos lineales no son la mejor representación del fenómeno del consumo de combustible, dado que deja sin considerar una cantidad considerable de factores operacionales.

Es en este contexto que la Empresa decidió continuar este estudio mediante su programa de memorias, permitiendo hacer un seguimiento de la instalación, las pruebas y el estado de los equipos al final, además de dar más tiempo para encontrar una metodología para el análisis de datos de un fenómeno tan complejo como la el consumo de combustible.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

- Evaluación del Impacto de la Tecnología Productora de Oxihidrógeno en la Disminución del Consumo de Combustible en Equipos de una Empresa Forestal.

1.3.2. Específicos

- Determinar el consumo de combustible de los equipos seleccionados en función de las condiciones operacionales.
- Medir la diferencia del consumo de combustible de los mismos equipos tras la intervención del oxihidrógeno.
- Evaluar la factibilidad de implementar esta tecnología en otras áreas de la empresa.

2. Marco Teórico

2.1. Combustibles Fósiles

Por gran parte de la historia, el ser humano ha utilizado distintas fuentes de energías para subsistir, pero no fue hasta la revolución industrial en el siglo XVIII que se desbloqueó una fuente de energía que cambiaría los modelos económicos, la facilidad y rapidez del transporte, y la accesibilidad de bienes y servicios. Esta fuente de energía se denomina como *Combustibles Fósiles* [2].

Los combustibles fósiles son el resultado de la compresión y el calentamiento prolongado de material orgánico, el cual ha sido depositado por miles de años en la corteza terrestre. Estos son la principal fuente de energía global, siendo que alrededor del 80 [%] de la demanda energética mundial es saciada por estos combustibles, debido a su densidad energética, adaptabilidad y confiabilidad operacional [3].

En términos generales existen tres tipos de combustibles fósiles, siendo el carbón o “Coal”, el petróleo u “Oil” y el gas natural o “Gas” [4]. Estos combustibles se diferencian tanto en su estado de materia (Sólido, líquido y gaseoso respectivamente), y en sus propiedades fisicoquímicas, destacando el *Poder Calorífico*, el cual es la energía producida por la combustión completa de los combustibles [5]. Esta se puede medir de forma bruta, mediante el poder calorífico superior (HHV), el cual es la energía producida por la combustión del combustible, incluyendo el vapor de agua, o de forma neta, mediante el poder calorífico inferior (LHV), siendo la energía producida por la combustión, excluyendo el vapor de agua. Por lo general se trabaja con el poder calorífico inferior [5].

2.1.1. Tipos de Combustibles Fósiles

1. **Carbón:** El primer combustible fósil utilizado de forma masiva por el ser humano es el carbón, un mineral con altos porcentajes de carbono en su composición, química que se utiliza principalmente en centrales térmicas [6].

El carbón se puede clasificar en cuatro grupos, los cuales varían en su composición química, poder calorífico y accesibilidad al recurso, siendo el carbón antracita, el carbón bituminoso, sub-bituminosos y el carbón lignito [6].

Tabla 4: Tipos de Carbón [6]

Tipo de Carbón	Cantidad de Carbono [%]	Poder Calorífico Inferior [kJ/kg]
Antracita	92	35.000
Bituminosos	86	25.000
Subbituminosos	45	24.500
Lignito	35	20.000

De estos, la Antracita es el tipo de carbón más escaso de todos, siendo que, en uno de los mercados más demandantes de este combustible fósil, Estados Unidos, este tipo de carbón solo representa el 1 [%] de la producción total [6]. Los más utilizados son los bituminosos y sub-bituminosos [6].

2. **Gas Natural:** El combustible fósil más moderno, el gas natural, es una mezcla gaseosa de compuestos químicos formados de carbono e hidrógeno (hidrocarburos), siendo principalmente una mezcla de etano y metano [7]. Al igual que el carbón, el gas natural se utiliza principalmente de centrales térmicas, pero a diferencia de este posee un gran uso en el área residencial [7].

En términos prácticos, el gas natural utilizado comercialmente es 90 [%] metano, y posee un LHV de 45.000 [kJ/kg] [7].

3. **Petróleo:** El combustible fósil más utilizado actualmente [7], el petróleo es una mezcla de hidrocarburos en estado líquido, los cuales poseen una composición química de 85 [%] carbono y 15 [%] hidrógeno [8]. Este combustible se debe tratar para ser utilizado comercialmente, en un proceso denominado como refinación, el cual genera lo que se denomina “*derivados del petróleo*”, productos químicos utilizados como combustibles en el transporte, la calefacción, generación de electricidad y como materia prima [8]

En términos generales, la refinación de petróleo consta de tres etapas [8].

- a) Separación: La separación o destilación consiste en transportar el petróleo crudo a un sistema de hornos, donde debido al calor, se separa en diversos componentes de acuerdo con su punto de ebullición [8].

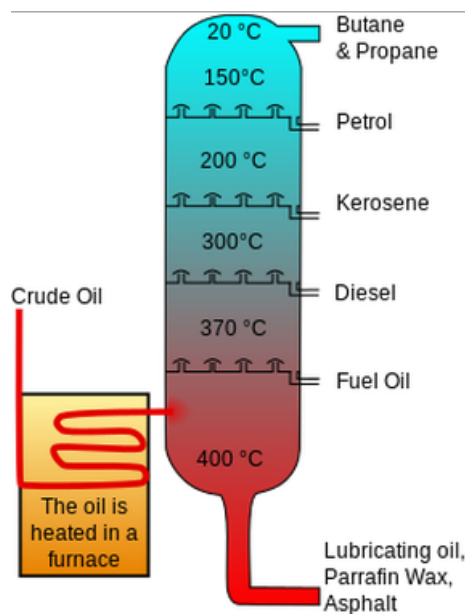


Figura 1: Esquema de separación del petróleo [9]

- b) Conversión: Después de la separación, existe una serie de procesos para tratar los derivados del petróleo más densos para convertirlos en combustibles más valiosos, definido como conversión, siendo la metodología más utilizada el *Cracking* [8]; proceso donde mediante la aplicación de calor, presión, y sustancias aceleradoras de reacciones químicas (Catalizadores), se descomponen las moléculas de hidrocarburos más pesados [8].
- c) Tratamiento: El último proceso realizado en la refinación del petróleo es el tratamiento, fase donde se trabaja una selección de derivados del petróleo para lograr productos más especializados [8].

Al igual que los tipos de carbón, los derivados del petróleo varían en sus propiedades fisicoquímicas, lo que influye en la aplicación final de estos hidrocarburos.

Tabla 5: Derivados del petróleo y sus características principales [10,11]

Nombre	Composición química	LHV [kJ/kg]	Densidad [kg/L]	Aplicación principal
Gases licuados (Butano, Propano)	C ₃ H ₈ C ₄ H ₁₀	46 000 49 000	0.50–0.58	Cocción, calefacción, motores
Gasolina (Petrol)	C ₈ H ₁₈	44 000 47 000	0.70–0.75	Combustible para automóviles
Queroseno (Keroseno)	C ₁₀ –C ₁₆ H	43 000 46 000	0.78–0.82	Aviación (turbinas)
Diésel	C ₁₂ –C ₂₀ H	42 000 45 000	0.82–0.86	Transporte pesado, generación eléctrica
Fuelóleo (Fuel Oil)	C ₂₀ –C ₄₀ H	39 000 42 000	0.95–1.05	Centrales térmicas, calderas industriales
Aceites lubricantes (Lubricating oil)	C ₂₀ –C ₅₀ H	—	0.88–0.94	Lubricación de motores y maquinaria
Asfalto (Asphalt)	Mezcla de hidrocarburos pesados	—	>1.0	Pavimentación, impermeabilización

2.1.2. Desafíos Asociados al uso de Combustibles Fósiles

Si bien los combustibles fósiles han sido fundamentales en el desarrollo industrial y tecnológico de la humanidad [2], su uso conlleva una serie de desafíos significativos. El primero de ellos radica en la necesidad de transformar la energía química contenida en los hidrocarburos en energía útil, lo que ha exigido desde el siglo XVIII el diseño y perfeccionamiento de máquinas especializadas conocidas como máquinas térmicas. Esta transformación se produce a través del proceso de combustión, una reacción química entre el combustible y el oxígeno, que libera energía en forma de calor. Este calor es luego convertido, con rendimientos limitados por principios termodinámicos [12], en trabajo mecánico y/o energía eléctrica, mediante las máquinas térmicas.

El segundo desafío, cuya importancia ha ido en aumento desde comienzos del siglo XX [13], es la inestabilidad del mercado de los combustibles fósiles. Esta inestabilidad se debe, en gran parte, a su condición de recurso no renovable, y a su dependencia de las relaciones internacionales, siendo que la accesibilidad al suministro puede verse seriamente afectada por conflictos globales, sanciones o tensiones diplomáticas, como se evidenció al inicio de la guerra entre Rusia y Ucrania en el año 2022 [14].

Finalmente, uno de los retos más urgentes es el control y la reducción de los gases de efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes emitidos durante la combustión de estos combustibles [15]. A nivel internacional, se han establecido acuerdos como el Tratado de París del 2015 [16], con el objetivo de limitar dichas emisiones. No obstante, el consumo global de combustibles fósiles ha seguido una tendencia creciente, como se observa en la Figura 2.

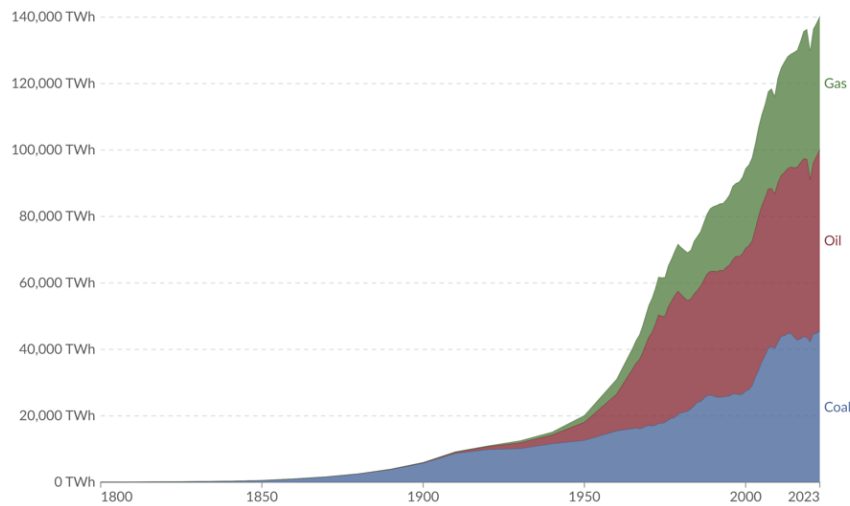


Figura 2: Consumo de combustibles fósiles global [7].

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y contaminantes derivados del uso de combustibles fósiles dependen principalmente de la composición química del combustible y de las condiciones en que ocurre la combustión. Un factor determinante es la cantidad de oxígeno disponible durante la reacción, lo que se expresa mediante la relación aire-combustible (λ). Esta relación indica si la combustión ocurre en condiciones estequiométricas ($\lambda = 1$), con exceso de aire ($\lambda > 1$) o con déficit de oxígeno ($\lambda < 1$), y tiene una influencia directa tanto en la temperatura de la combustión como en la composición de los gases emitidos [15].

En función de estas condiciones, y considerando los combustibles más utilizados en el mercado actual, es posible establecer las reacciones químicas que representan la combustión de estos combustibles. A continuación, se presentan algunos de estos balances químicos, los cuales sirven de base para el análisis de las emisiones según el tipo de combustible y la relación aire-combustible empleada [15].

Tabla 6: Balances térmicos combustibles más utilizados [15]

Combustible	Composición Química	Formula Química $\lambda < 1$	Formula Química Estequiométrico $\lambda = 1$
Carbón	C	$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$	$C + O_2 \rightarrow CO_2$
Gasolina	C_8H_{18}	$C_8H_{18} + 9O_2 \rightarrow 8CO + 9H_2O$	$C_8H_{18} + 12,5O_2 \rightarrow 8CO_2 + 9H_2O$
Diésel	$C_{12}H_{26}$	$C_{12}H_{26} + 15O_2 \rightarrow 12CO + 13H_2O$	$C_{12}H_{26} + 18,5O_2 \rightarrow 12CO_2 + 13H_2O$
Butano	C_4H_{10}	$C_4H_{10} + 4O_2 \rightarrow 4CO + 5H_2O$	$C_4H_{10} + 6,5O_2 \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O$
Propano	C_3H_8	$C_3H_8 + 3O_2 \rightarrow 3CO + 4H_2O$	$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$

Estas fórmulas sirven como guías generales para evaluar el estado de la combustión, pero dependiendo del tipo de máquina térmica, su aplicación y los aditivos incluidos en el combustible, la composición de los gases resultantes de la combustión o *Gases de Escape* cambia, esto se aprecia especialmente en la industria del transporte, con el uso de los **Motores de Combustión Interna** [17].

2.2. Motores de Combustión Interna

Los motores de combustión interna son una tecnología que ha estado en una constante evolución desde que Étienne Lenoir inventó su primer prototipo de una maquina que transforma la energía química latente en los combustibles en energía mecánica, al crear un motor de dos pistones que, mediante la combustión de una mezcla de gas de carbón y aire, podría generar hasta dos caballos de fuerza [18].

Gracias a este diseño, se popularizó el concepto de estas maquinas térmicas, llegándose a producir alrededor de 5.000 modelos entre 1.860 y 1865, llegando a una eficiencia máxima del 5% [18]. A pesar de esto, no fue hasta el trabajo de Nicolaus Otto y Rudolf Diesel que los motores de combustión interna se pudieron convertir en las tecnologías que son ahora. Dada la importancia de su trabajo que se clasifica de forma genérica a estos equipos en “Motores Diésel” y “Motores Otto” o "Motores de Gasolina", aunque si se desea ser más específicos, estos equipos se pueden clasificar de distintas formas [17]:

1. **Aplicación:** Para vehículos grandes o pequeños, generación de potencia u otros.
2. **Ciclos de trabajo:** 4 o 2 tiempos.
3. **Tipo de combustible:** Gasolina, petróleo, diésel, gas natural, metanol, etc.
4. **Tipo de enfriamiento:** Enfriados por aire, agua u otros.
5. **Métodos de ignición:** Ignición por chispa o por compresión.

Independiente de su clasificación, los motores de combustión interna están compuestos por los siguientes componentes principales [17].

1. **Bloque:** Es la pieza más grande del motor, la cual tiene la función de dar un lugar a otros elementos, dando un espacio para los descansos de los elementos rotatorios, conductos para fluidos refrigerantes y espacios para los pistones.
2. **Culata:** Es la “tapa” del bloque, dando un techo para los cilindros y un espacio para las válvulas de admisión y escape. La culata y el bloque forman la *Cámara de Combustión*, el espacio donde se desliza el pistón, transformando la energía química de la combustión en energía mecánica.
3. **Pistón:** Como se menciona anteriormente, este elemento es el que transforma la energía de la combustión en energía mecánica, mediante el un movimiento vertical, el cual se transmite al cigüeñal mediante biela.
4. **Cigüeñal:** Este es el elemento que transmite la energía del motor al equipo deseado. Además, es el punto de conexión para todos los pistones que tenga el motor, de tal forma que, mientras un pistón desciende por la cámara de combustión, otro sube; generando así un movimiento continuo.
5. **Biela-manivela:** Elementos que conectan los pistones al cigüeñal, convirtiendo el movimiento vertical de los primeros en el movimiento rotativo del último.
6. **Válvulas:** Ubicadas en la parte superior de la cámara de combustión, son los elementos encargados del flujo de gases. Dependiendo del tamaño del motor pueden ser 1 o 2 válvulas.

7. **Sistema de Inyección:** Este sistema está encargado de suministrar de combustible cada una de las cámaras de combustión del motor. Esta inyección posee una serie de requerimientos para que se logre una combustión exitosa, tales como la presión de inyección, la cual debe superar la presión interna de la cámara al momento de comprimir el aire (alrededor de los 600 [psi] [17]), el "*timing*" de la inyección, refiriéndose al momento en que comienza y termina la inyección respecto a la posición del pistón, y la pulverización del combustible.

2.2.1. Funcionamiento

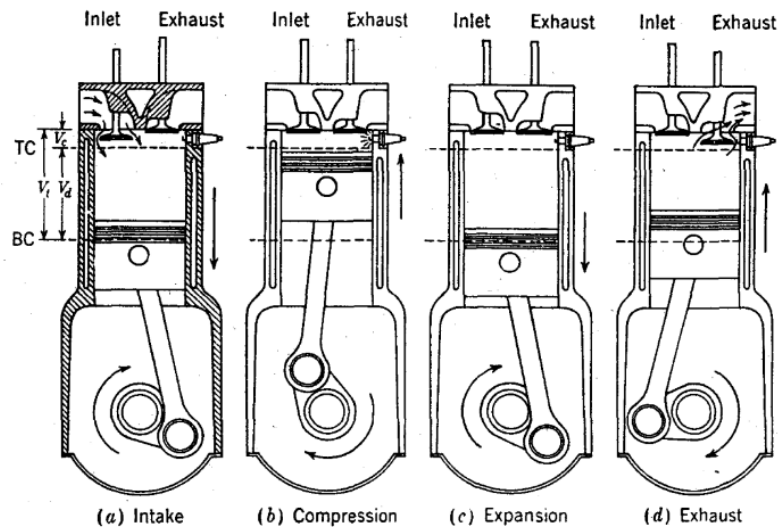


Figura 3: Ciclo de trabajo de 4 tiempos [17].

Los motores de combustión interna poseen dos tipos de ciclos de trabajo, los de 4 tiempos, siendo la admisión (Intake), la compresión (compression), expansión (expansion), y el escape (exhaust) de los gases de escape; y de 2 tiempos, siendo la compresión y expansión [17].

Profundizando el ciclo de trabajo de 4 tiempos, se tiene la fase de admisión, donde se abre la válvula de admisión de aire, y gracias al movimiento vertical del pistón, el cual se desplaza hacia la parte más baja de la cámara de combustión, o **el punto muerto inferior**, se genera un efecto de "succión", impulsando el aire al interior.

En la fase de compresión se cierra la válvula de admisión y el pistón es impulsado por el movimiento del cigüeñal y "sube" por la cámara de combustión, comprimiendo los gases a medida que llega a la parte superior de la cámara de combustión, o **el punto muerto superior**. Poco antes de que el cilindro llegue al punto muerto superior, se inicia la combustión de la mezcla aire combustible.

Debido a la fuerza generada por la combustión el pistón es impulsado nuevamente al punto muerto inferior, en la fase de expansión.

La fase final, de escape, inicia cuando el pistón empieza a subir nuevamente, a la vez que se abre la válvula de escape, permitiendo así la salida de los gases resultantes de la combustión. En la Figura 3 se puede apreciar un ciclo de trabajo de 4 tiempos. La mayor diferencia en el modo de operación de un motor Otto o Diésel es en la fase que se inyecta el combustible y la forma de combustión de este. Para los motores Otto, se llena la cámara de combustión con una mezcla homogénea de aire combustible en la fase de admisión, y mediante se termina la compresión, esta mezcla es encendida por una chispa iniciada por una bujía, ubicada en la culata. Por otro lado, en la fase de admisión de los motores Diésel se le proporciona únicamente aire a la cámara de combustión, a veces apoyado con un turbo compresor; y a fines de la compresión, se inyecta combustible pulverizado, creando una mezcla estratificada, la cual se enciende por el aumento de temperatura producido por la compresión del aire.

2.2.2. Problemas asociados con los motores de combustión interna

Como se especifica en el la Sección 3.2. desde el trabajo de Nicolaus Otto y Rudolf Diesel que el uso de los motores de combustión interna en la industria ha crecido constantemente, logrando mantenerse como una de las oLHVones más confiables de generación de energía, logrando satisfacer el 99 [%] de la demanda energética del mercado del transporte [19]. A pesar de esto, los motores de combustión interna no son perfectos, donde se destacan dos problemas asociados a su uso.

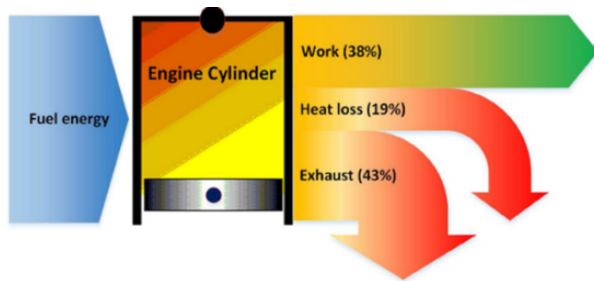
Uno de los mayores problemas es la contaminación atmosférica resultante de su operación [17], donde además de producir gases de emisiones típicos de la combustión de hidrocarburos (CO_2 , CO , O_2), se puede producir una gran cantidad de material particulado en forma de hollín, resultado de una combustión incompleta de los hidrocarburos y reactivos del nitrógeno (NO_x) [17].

Además, se destaca la baja eficiencia térmica de estas maquinas, siendo que si bien los motores actuales pueden llegar a una eficiencia teórica superior al 50 [%] [20], en la practica esta está limitada por las condiciones operacionales, disminuyendo hasta valores menores del 30 [%] [21].

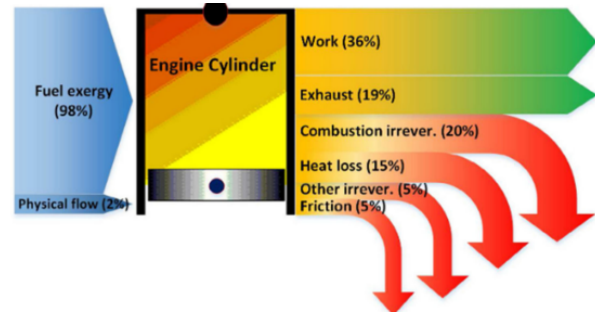
En general las pérdidas generadas en la operación de los motores de combustión interna se desglosa de la siguiente forma [21]:

- Energía útil: Alrededor del 30[%] de la energía producida en la combustión se transforma en energía mecánica útil en condiciones favorables.
- Gases de escape: Se estima que las mayores perdidas de la combustión están en los gases de escape, tanto por el calor que se encuentra vigente en estos gases, para el cual ya hay metodologías para recuperarla, como los turbocompresores, y las perdidas producidas por una combustión incompleta. Este fenómeno nace del no tener las condiciones adecuadas en la cámara de combustión para terminar las reacciones químicas de este proceso, perdiendo energía útil y aumentando los gases de emisión y el material particulado.
- Refrigerante: Otra gran parte de las perdidas presentes en la operación de un motor de combustión interna es el calor absorbido por los líquidos refrigerantes. La diferencia con el calor perdido en los gases de escape, es que estas perdidas son necesarias, dado que si no se elimina este calor de la combustión se puede dañar los componentes del motor.
- Fricción: La ultima perdida característica del trabajo de un motor de combustión interna, y la que suele ser la menor, es la perdida producida en el roce de sus componentes móviles.

En la Figura 4 se ve un resumen del desglose de la energía producida en la combustión y como esta se distribuye en el ciclo de trabajo del motor.



((a)) Esquema de distribución de la energía de combustión



((b)) Esquema de distribución del trabajo del motor

Figura 4: Esquemas de distribución de energía y trabajo de un motor [21]

2.3. Oxihidrógeno

Bajo el contexto de la vigente demanda energética, y los problemas asociados al uso de los combustibles fósiles, se han investigado y desarrollado una gran cantidad de elementos y tecnologías para satisfacer esta demanda de forma sustentable y sostenible [22]. Una alternativa que ha emergido actualmente, a pesar de no ser un descubrimiento nuevo, es el *Oxihidrógeno*.

El oxihidrógeno (HHO) es un gas compuesto por una mezcla de hidrógeno y oxígeno [23], el cual como combustible posee un LHV significativamente mayor que los combustibles fósiles más utilizados en el mercado [24]. A pesar de esto, este gas aún no se utiliza de forma masiva debido a los desafíos asociados a este combustible.

Por una parte, debido a la presencia de hidrógeno en esta mezcla, el almacenamiento y transporte de este se vuelve más complejo, dado a su baja densidad se necesita más espacio físico o comprimir el gas a presiones más altas, lo que implica un uso de materiales especializados [25]. Además, debido al pequeño tamaño de las partículas de hidrógeno, aumenta el riesgo de las filtraciones del gas [25] lo que significa un riesgo operacional, y en casos más extremos, las partículas de hidrógeno se pueden incrustar en la estructura molecular de los materiales que lo almacenan (principalmente en aceros), en lo que se define como *fragilización por hidrógeno*.

Además de estos desafíos, existe el problema de obtener este gas. Si bien el oxígeno se encuentra en la misma atmósfera que respiramos, el hidrógeno como elemento individual no se encuentra en la naturaleza, por lo que se debe extraer de otros compuestos [26].

El hidrógeno se puede obtener de las siguientes fuentes:

1. **Hidrocarburos:** Actualmente la mayor cantidad de hidrógeno producido en la industria proviene del procesamiento de los hidrocarburos [26], siendo el principal de estos procesos el Reformado de Metano por Vapor (SMR), proceso donde gas natural es calentado por vapor de agua a altas temperaturas, entre 700[°C] a 1.000 [°C] [26].

La reacción del gas natural, el vapor de agua y los catalizadores inyectados en el ambiente, produce hidrógeno (H₂) y monóxido de carbono (CO), el cual reacciona nuevamente con el vapor de agua y los catalizadores para convertirse en dióxido de carbono (CO₂) [26].

Este proceso genera lo que es denominado como *Hidrógeno Gris*, debido a que su producción genera gases de efecto invernadero (CO₂), pero si estos gases son capturados, almacenados y/o reutilizados, el proceso se denomina como *“Hidrógeno Azul”*.

La reacción química de este proceso en las Ecuaciones (1) y (2) [26]:



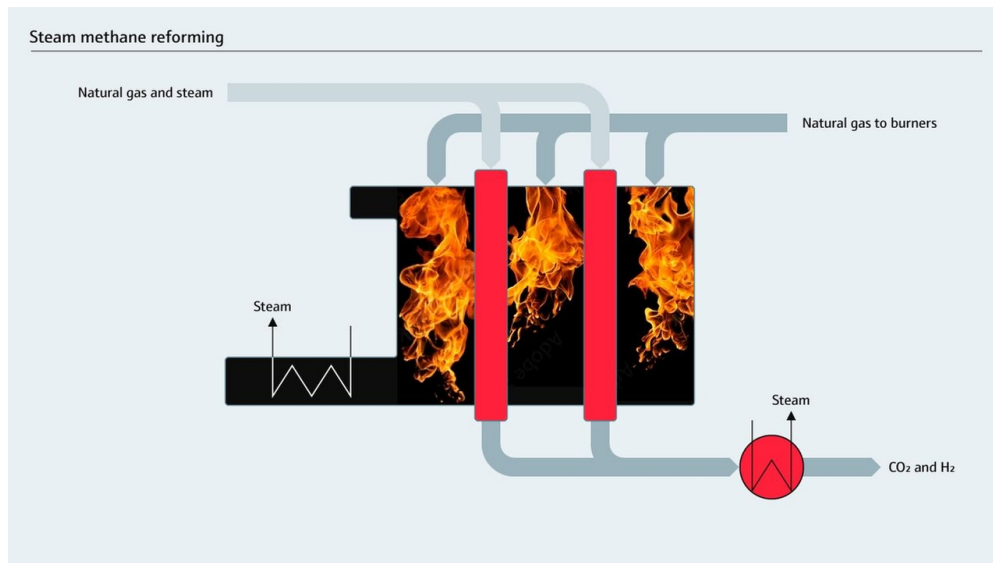
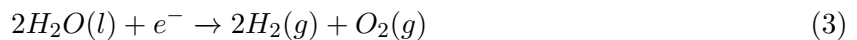


Figura 5: Reformado de Metano por Vapor [27]

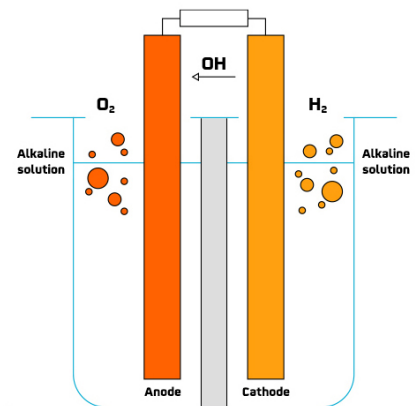
2. **Agua:** Si bien la metodología para obtener hidrógeno de agua se descubrió a mediados del siglo XIX por los científicos Anthony Carlisle y William Nicholson [28], no fue hasta la necesidad actual de obtener una fuente de energía renovable y confiable que se empezó a evaluar la factibilidad de la implementación de esta metodología en más áreas [29]. Esta técnica se denomina como *electrólisis*.

La electrólisis es el proceso de separar la molécula de agua (H₂O) en Hidrógeno (H₂) y Oxígeno (O₂), mediante el paso de una corriente eléctrica de alta intensidad, que va desde un ánodo hasta un cátodo, pasando por una membrana (o diafragma) que separa a ambos, representado en la Ecuación (3) [30]. Para generar la electrólisis se utilizan reactores llamados **electrolizadores**, los cuales varían en su aplicación [31].

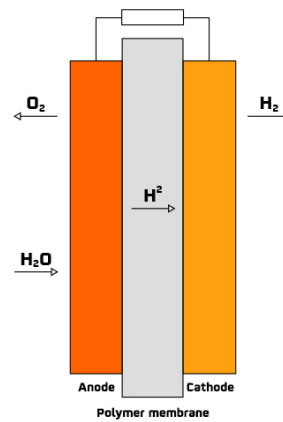


Existen los **Electrolizadores Alcalinos**, los cuales utilizan una solución electrolítica líquida, es decir, requieren una mezcla de agua destilada y algún químico electrolítico, los cuales suelen ser el hidróxido de potasio (**KOH**) o el hidróxido de sodio (**NaOH**). Son los más antiguos en uso y más económicos, pero son poco flexibles en su uso y producen hidrógeno de baja pureza.

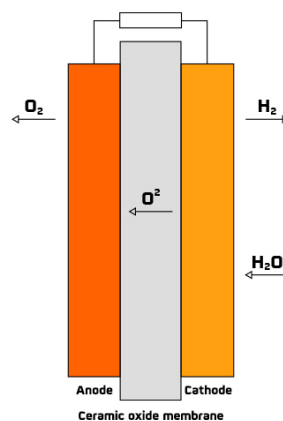
Además existen los **Electrolizadores PEM**, los cuales utilizan una solución electrolítica líquida, es decir, requieren una mezcla de agua destilada y algún químico electrolítico, los cuales suelen ser el hidróxido de potasio (KOH) o el hidróxido de sodio (NaOH). Son los más antiguos en uso y más económicos, pero son poco flexibles en su uso y producen hidrógeno de poca pureza. Por último, existen los **Electrolizadores SOEC**, o de óxido sólido, los cuales aún están en desarrollo, pero tienen el potencial de ser mucho más eficientes que los alcalinos y los PEM [31].



((a)) Electrolizador Alcalino



((b)) Electrolizador PEM



((c)) Electrolizador SOEC

Figura 6: Tipos de electrolizadores [31]

A diferencia de la producción de hidrógeno a partir de los hidrocarburos, el uso de electrolizadores tiene el potencial de ser generado sin producir gases de efectos invernaderos, obteniendo energía eléctrica a partir de fuentes renovables (Energía solar, eólica, hidráulica) [26], el hidrógeno producido por estos procesos se denomina como

“

Hidrógeno Verde].

La producción de hidrógeno mediante electrólisis depende directamente de la energía eléctrica utilizada, siendo definidas por las *Leyes de Faraday*.

Las leyes de Faraday de la electrólisis establecen las relaciones cuantitativas entre la cantidad de electricidad que pasa por una solución electrolítica y la masa de sustancia liberada en los electrodos durante el proceso [32].

La primera ley de Faraday, representada por la Ecuación (4), establece que la masa de una sustancia liberada por un electrodo es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que pasa por la solución [32].

$$m = \frac{Q \cdot M}{z \cdot F} \quad (4)$$

Donde m es la masa de la sustancia medida en gramos, Q es la carga eléctrica total que circula en el tiempo, la cual se mide en culombios; M es la masa molar de la sustancia, z es el número de electrones intercambiados por ion, y F es la constante de Faraday.

La segunda ley de Faraday, representada por la Ecuación (5), establece que, para una misma cantidad de electricidad, las masas de diferentes sustancias depositadas o liberadas en los electrodos son directamente proporcional a sus pesos equivalentes, siendo esto su masa molar dividida por el número de electrones intercambiados en la reacción [32].

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{M_1/z_1}{M_2/z_2} \quad (5)$$

2.3.1. Uso de Oxihidrógeno en Motores de Combustión Interna

El oxihidrógeno (HHO) ha sido empleado en diversas áreas de la industria, siendo tradicionalmente usados en la industria manufacturera, para el corte de aceros y la soldadura [34]. Además, debido a su alto LHV. y a que su combustión no genera gases contaminantes, como CO_2 o hidrocarburos no quemados [33], ha nacido un interés en el uso de este gas en la generación de energía. En particular, su aplicación en el sector del transporte, dado su potencial en la descarbonización el sector [34].

El HHO puede implementarse de dos formas principales en los motores de combustión interna, tanto como combustible secundario (Bi Fuel) o como aditivo, donde la generación del gas y la inyección a la cámara de combustión puede variar según la estrategia implementada.

En el primer caso, el gas se puede inyectar de forma directa a la cámara de combustión mediante un sistema de inyección independiente, lo cual implica una carga adicional al sistema, debido a que se debe comprimir el HHO a presiones iguales o mayores a las de la cámara de combustión [17].

La segunda forma de aplicación es por una inyección indirecta, donde el HHO se introduce al sistema de admisión de aire del motor. De esta forma el gas se mezcla con el aire antes de ingresar a la cámara de combustión, aprovechando el efecto de succión en la fase de admisión del motor [35]. Este enfoque tiene la ventaja que no requiere modificar el sistema de inyección original.

Independiente del método de inyección, el HHO tiene el potencial de mejorar la combustión en los motores de combustión interna. Esto se debe a que aprovecha los beneficios del oxígeno, el cual enriquece la combustión del combustible al lograr una oxidación más completa, reduciendo así la generación de contaminantes como CO y NOx; y del hidrógeno, que debido a su alto LHV. y su alta velocidad de llama, facilita la propagación de la combustión, reduce el retardo de encendido y mejora la eficiencia del proceso térmico global [36]. La Tabla 7 presenta la diferencia en las propiedades térmicas entre el hidrógeno y algunos hidrocarburos mencionados previamente.

Tabla 7: Comparación de las propiedades del Hidrógeno y otros combustibles [36]

Propiedades	Hidrógeno*	Metano	Gasolina sin plomo	Diésel
LHV [MJ/kg]	120,21	47,14	43,9	42,61
LHV [MJ/m ³]	9,86	33,94	No aplica **	No aplica **
Velocidad de llama laminar [cm/s]	230	42	37–43	30
Densidad [kg/m ³] a 16 °C y 1.01 bar	0,082 (G)	0,72 (G)	721–785 (L)	833–881 (L)
Relación aire-combustible estequiométrica (AFR)	34,3	17,2	14,6	14,7
Temperatura de autoignición [°C]	585	595	260–460	254–285

*Si bien se presenta las propiedades térmicas del hidrógeno, están son semejantes a las del HHO, al ser el hidrógeno el elemento comburente de la mezcla, dado esto se aproxima el LHV del HHO como **120 [MJ/kg]**.

** Para combustibles líquidos cuya densidad es considerable, no se presenta el poder calorífico por metro cubico.

Desde un enfoque operacional, el uso del HHO permite satisfacer la demanda energética sin la necesidad de aumentar el flujo de combustible. Esto se traduce en una reducción directa del consumo específico de combustible (SFC), un indicador ampliamente utilizado para medir el rendimiento de los motores de combustión interna. La reducción del SFC implica un menor gasto de combustible por unidad de potencia generada, lo que mejora de forma directa la *eficiencia térmica* (η_t).

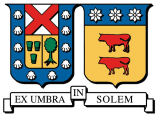
Además de mejorar la eficiencia global del motor, disminuir el SFC contribuye a reducir los costos operacionales, disminuyendo el consumo de combustible sin disminuir la disponibilidad de los activos.

Se utilizan la ecuación (6) y la ecuación (7) para calcular el **SFC** y el η_t [17]:

$$SFC = \frac{\dot{m}_{combustible}}{P_{salida}} \quad (6)$$

$$\eta_t = \frac{1}{SFC \cdot LHV} \quad (7)$$

Donde $\dot{m}_{combustible}$ es el flujo másico de combustible consumido [kg/s], P_{salida} es la potencia útil generada por el motor [W], y LHV es el poder calorífico inferior del combustible [MJ/kg].



Estas relaciones permiten evaluar el efecto del HHO en el rendimiento energético del motor, lo que es la base de una evaluación de desempeño de este gas.

3. Estado del arte

3.1. Investigaciones del uso del Oxihidrógeno en Motores de Combustión Interna

La demanda energética, la irregularidad de los precios de los combustibles fósiles y la lucha contra el cambio climático y la contaminación ha llevado al estudio de combustibles sustentables y renovables.

Se ha demostrado que los motores convencionales pueden funcionar con combustibles de bajo carbono [30], dado esto la búsqueda de combustibles energéticamente eficientes, buen poder calorífico y poco contaminante, ha colocado al hidrógeno (H_2) como la mejor alternativa a trabajar con los combustibles fósiles [35]. A pesar de esto, debido a la dificultad de trabajar con hidrógeno, la implementación típica en las investigaciones es con el proceso de electrólisis, creando Oxihidrógeno (HHO) [30].

Se han realizado varias investigaciones para estudiar el impacto del HHO en motores de combustión interna, tanto de forma teórica, mediante simuladores computacionales [30], como de forma física, instalando equipos de electrólisis en bancos de prueba [35,37,38,39] y en vehículos, midiendo sus indicadores de desempeño en dinamómetros de chasis [40,41].

En 2023, Al-Dawody et al [30] utilizaron el software diesel-RK para simular lo que pasaría al agregar 10[%] de HHO a un motor de un cilindro a distintas velocidades. Obtuvieron como resultado que la potencia de frenado subió desde el 9[%] hasta el 16[%]. La eficiencia térmica subió un 31,5[%]. El consumo de combustible bajo un 20[%] y la reducción máxima de BSN ocurrió a las 3.500 [rpm].

Babu,J et al en 2023 [35] realizaron una investigación experimental centrado en la adición un flujo constante de oxihidrógeno (alrededor de 60[L/hr]) en la combustión de diésel y una mezcla de diésel y metano, variando la velocidad del motor y la presión de entrada. Centrándose en la primera parte, se obtuvo que en promedio el consumo específico de combustible disminuyó un 4[%], mientras que la eficiencia térmica aumento un 11[%]. Respecto a los gases de emisiones, se observo que el CO fue el que más se redujo, alrededor de un 20[%] en todas las presiones de entrada; el resto de gases también presentaron una reducción de emisiones, pero en menor escala.

Este experimento fue logrado instalando un equipo electrolizador en un banco de prueba con un motor de cuatro cilindros, cuyas especificaciones se adjuntan en la Figura 7. Este fue alimentado por baterías externas. Este equipo inyecta gases HHO en la admisión de aire del motor. A continuación se presenta esta instalación:

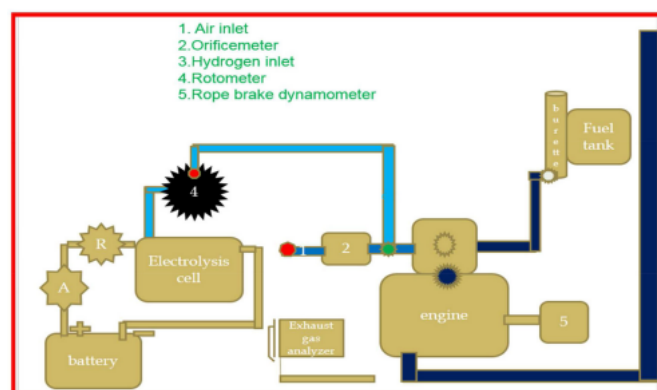


Figura 7: Esquema de la instalación de Babu,J et al [35]

Tabla 8: Motor utilizado por Babu, J et al [35]

Pistón	9[mm]
Carrera	105 [mm]
Radio compresión	19:1
Volumen desplazado	418 [cm^3]
Poder de salida	5,5 [kW] a 3.000 [rpm]

Elgarhi, I et al, el 2020 [37] realizaron un experimento en que inyectaron un flujo constante de HHO (0,1[L/min]) a un motor combustionando con diésel y mezclas diésel-metano, midiendo el impacto a distintas rpm y potencia de freno. Para este estudio nos enfocaremos en los resultados con diésel puro. Se observa que para los casos de baja velocidad (1500 [rpm]), la eficiencia térmica del motor mejoro alrededor del 3[%], mientras que en las velocidades más altas (2250 [rpm]) ésta mejoró alrededor del 15[%].

Este experimento se realizó instalando un rectificador que transformo la corriente alterna de la red a corriente continua, con el fin de dar energía constante al equipo electrolizador. Este alimenta HHO a la admisión de aire del motor, el cual presenta las siguientes características.

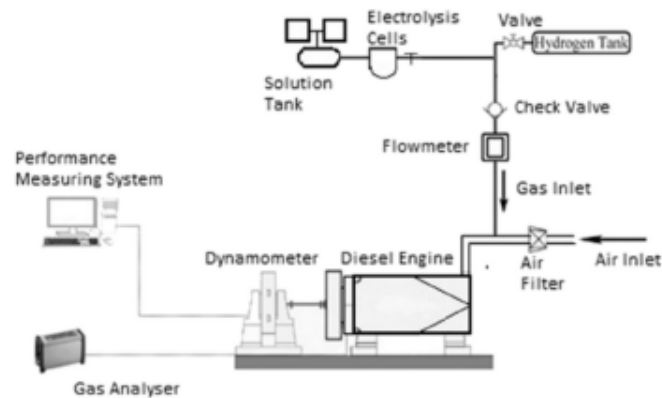


Figura 8: Instalación de Elgarhi, I [37]

Tabla 9: Motor utilizado por Elgarhi, I et al [37]

Pistón	87,5[mm]
Carrera	110 [mm]
Radio compresión	17,5:1
Poder de salida	5,2 [kW] a 1.550 [rpm]

Sabeghi, M et al, el 2022 [38] estudiaron el impacto de la inyección de HHO en la formación de gases contaminantes, durante la combustión de diésel, funcionando en ralentí y a bajas temperaturas. Se indica que con la inyección de 10 a 45 [ml/s] de oxihidrógeno, los cuales fueron variando según la corriente eléctrica suministrada. En promedio, se disminuyó la formación de CO, CO_2 , HC, NOX un 66[%], 33[%], 38[%] y 11[%] respectivamente, y por otra parte, aumento el porcentaje de oxigeno en las emisiones un 18[%].

Para este experimento, se alimentó mediante la red eléctrica y baterías al equipo electrolizador, el cual suministro al motor con el gas HHO.

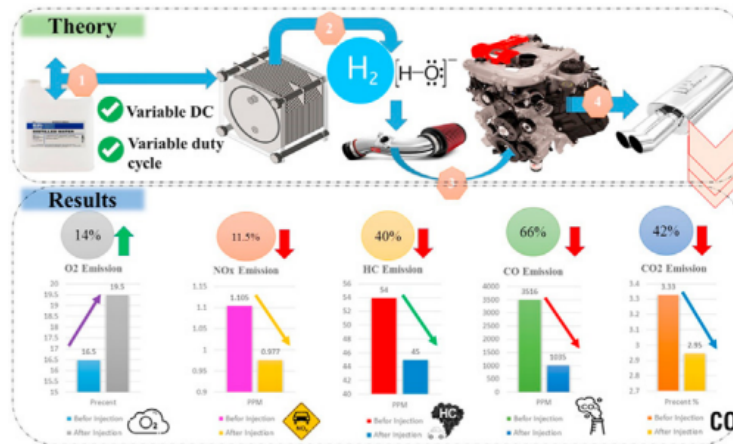


Figura 9: Resumen del experimento de Sabeghi et al [38]

Tabla 10: Motor utilizado por Sabeghi et al [38]

N° pistones	4
Estándar de emisiones	Euro 4
Volumen del motor	2.800 [cm ³]
Poder de salida	70 [kW] a 4.800 [rpm]

Trujillo-Olivares, I et al, el 2023 [39] realizaron un experimento de inyección de oxihidrógeno en un motor diésel, pero se centraron en el impacto físico que sufrió el equipo. Para este estudio compararon con un análisis visual el daño de cada componente interno del equipo, después de trabajar 500 horas con HHO y diésel, y con solo diésel.

Los resultados vistos de este estudio indican que después de este tiempo de trabajo, los daños producidos en los elementos del equipo con puro diésel provienen de la combustión incompleta, formando depósitos de carbón en el pistón, inyector y otros elementos. Por otra parte, el impacto visto en los equipos que funcionan con HHO (a un flujo de 2 [L/min]) es producto de corrosión producido por el ingreso de material del electrolizador a la cámara de combustión, además de una leve fragilización de algunos componentes.

Este experimento fue realizado un electrolizador alcalino que fue suministrado de energía eléctrica por los mismos motores de prueba, los cuales estaban conectados a un generador.

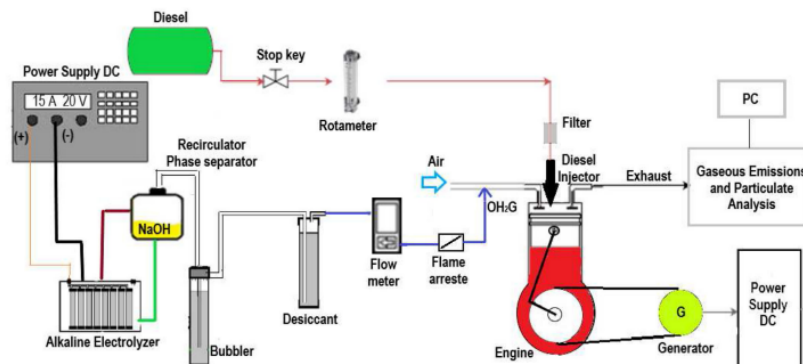


Figura 10: Instalación de Trujillo-Olivares, I et al [39]

Tabla 11:]

Motor utilizado en el experimento de Trujillo-Olivares, I et al [39]

Diámetro pistón	90 [mm]
Carrera	105 [mm]
Volumen desplazado	418 [cm^3]
Poder de salida	5,5 [kW] a 3.000 [rpm]

Wang, M, et al, el 2023 [40] realizaron un experimento de inyección de oxihidrógeno en el motor de un camión de carga pesada, el cual se instaló en un dinamómetro de chasis. Este estudio se centro en medir el impacto del gas en el consumo de combustible y en la composición de los gases de escape.

Se obtuvo una relación directa entre el ahorro de combustible y la cantidad de HHO inyectado, la cual se relaciona con la disminución de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) y material particulado (PPM). Por otra parte, se detecto un aumento en la temperatura de combustión y en la formación de óxidos de nitrógeno (NO_x).

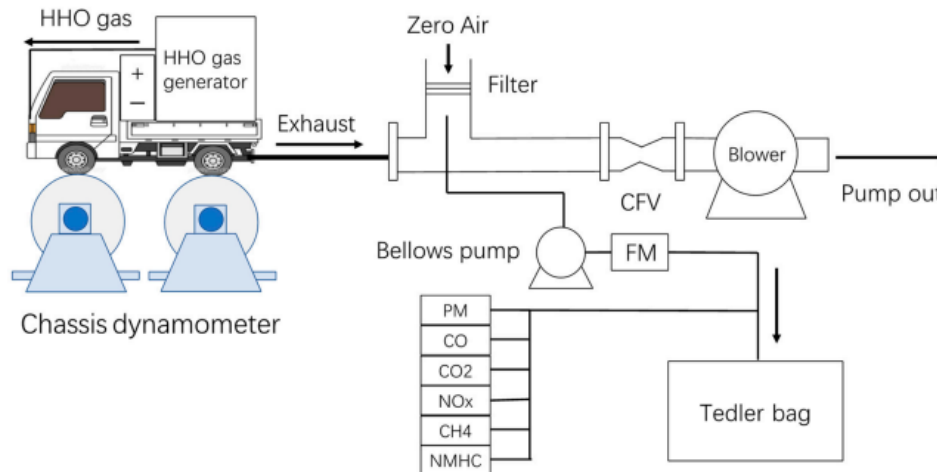


Figura 11: Instalación de Wang, M, et al [40]

Tabla 12: Motor utilizado en el experimento de Wang, M, et al [40]

Diámetro pistó	108 [mm]
Carrera	115 [mm]
Volumen	3600 [cm^3]
Poder de salida	96 [kW] a 3.200 [rpm]

Guan, M,et al, el 2024 [41], realizaron una investigación centrada en el caracterizar el comportamiento y rendimiento de un camión de carga pesada al operar con hidrógeno como combustible secundario (bi-fuel). Esto se logró mediante la instalación del vehículo en un dinamómetro de chasis.

Se obtuvo una reducción en la producción de CO_2 del 10 [%] al 35 [%], lo que se alinea con la cantidad de hidrógeno suministrado, además la producción de NO_x disminuyó un 30 [%] a 40 [%]. Por lo demás, se concluye que instalar un sistema de inyección de hidrógeno sin modificar el sistema de inyección de diésel, afecta a la admisión de aire y al “timing” de inyección de combustible, debido a que el computador del motor calcula un torque menor que el ejercido por el vehículo. La poca precisión en la admisión de

aire hizo que en la cámara de combustión no se encontrara el nivel adecuado de oxígeno, lo que produjo las consecuencias ya mencionadas y al aumento del porcentaje de CO en los gases de emisiones.

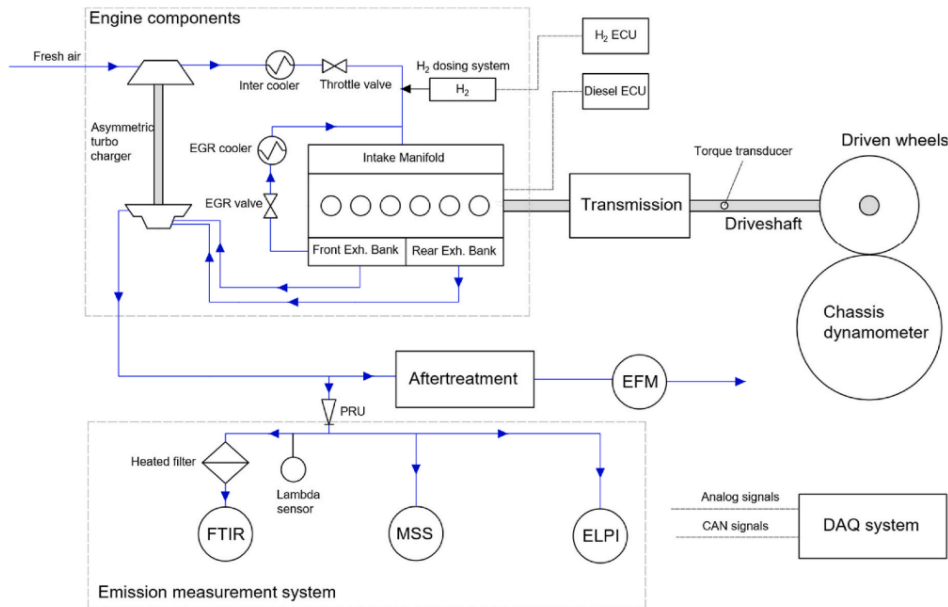


Figura 12: Instalación de Guan, M et al [41]

Tabla 13: Motor utilizado en el experimento de Guan, M et al [41]

Diámetro pistó	139 [mm]
Carrera	163 [mm]
Volumen desplazado	14,8 [l]
Poder de salida	340 [kW] a 1.800 [rpm]

Estos estudios son buenas comparaciones para entender el impacto que puede tener el uso de HHO en los equipos deseados, pero la metodología realizada no es la óptima para la empresa, dado que estas requiere detener el equipo un periodo indefinido de tiempo, lo que significa perdidas operacionales.

Dado esto, se decide buscar metodologías de caracterización de consumo de combustible a partir de mediciones en terreno, con el fin de evitar las perdidas de la empresa asociadas a este estudio.

3.2. Caracterización consumo de combustible en terreno

Uno de los mayores desafíos asociados al análisis del consumo de combustible en equipos móviles es la dificultad para caracterizarlo de manera precisa, debido a la multifactorialidad del proceso. Factores como las condiciones del terreno, las variaciones climáticas, la forma de operación, entre otras [42].

En la literatura se han encontrado varias investigaciones que proporcionan distintas metodologías para lograr una caracterización robusta del consumo de combustible de un equipo móvil, a partir de datos obtenidos terreno.

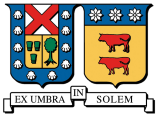
Estas investigaciones en general se clasifican en dos grandes categorías, la primera, la cual es ideal para casos con una gran cantidad de factores, con diversos grados de variabilidad, es la creación de modelos de consumo de los equipos a partir de datos reales. Para obtener resultados más efectivos, se necesita tener registro de los datos operacionales, como el estilo de trabajo y la condición del equipo, y datos ambientales, como las condiciones del terreno y meteorológicas.

La segunda categoría corresponde al diseño de experimentos centrados en medir el impacto en el consumo de los equipos, los cuales pueden variar en escala. Estos experimentos pueden ser realizados en ambientes controlados, donde se puede definir distintas variables, logrando así un estudio más preciso, similar a los expuestos en la sección anterior; o en terreno, para lo cual la organización “**SAE International**” creó una norma para estandarizar las pruebas de consumo de combustible.

Gong, J et al, el 2021 [42] realizaron un estudio que buscó determinar la metodología más precisa para predecir el consumo de combustible de camiones de carga pesada. Esto se logró tras adquirir más de mil recorridos de 34 camiones de carga pesada, donde se midieron 21 factores que afectan el consumo de combustible, que se midieron directamente de los computadores de los vehículos. Estos factores fueron discretos y continuos, y se clasificaron como, “Características de Conducción” (como el tiempo en neutro), “Características Ambientales” (como la temperatura), “Características del Vehículo” (como el peso)” y “Características de la Ruta” (como si es pavimentada o no).

De este estudio se concluye que dado la multifactorialidad del proceso, el uso de algoritmos de “*Machine Learning*”, una rama de la inteligencia artificial que se centra en que el computador identifique los patrones de comportamiento de los datos, es una ayuda crítica, logrando con estos modelos que logran predecir el consumo de combustible de esta flota de vehículos hasta con un 86,6 [%] de exactitud.

Mills, S, A et al, el 2019 [43] crearon un experimento basándose en la norma SAE J1321 para medir la diferencia en el consumo de combustible de una flota de camiones de carga pesada. Además de explicar los pasos seguidos por la norma (los que se explicarán más adelante), en esta investigación se profundiza el uso de la técnica del análisis de los componentes principales, otro algoritmo de Machine Learning que permite facilitar la selección de variables de un estudio.



Profundizando en la estandarización internacional, la norma SAE J1321 establece una serie de protocolos y consideraciones que se deben tener para realizar una prueba que busca medir las diferencias en el consumo de combustible de un vehículo después de alguna intervención. De estos protocolos se destaca lo siguiente [44]:

- Por cada vehículo que se intervenga, se debe tener otro vehículo que realice la misma operación en los días de prueba, esta pareja de vehículos se denomina Test (T) y Control (C).
- La pareja de vehículos debe ser lo más semejantes posibles, admitiendo una variación en el peso de un 1 [%], y en el kilometraje, que dependiendo de la antigüedad de los vehículos restringe cierta cantidad de kilómetros recorridos entre la pareja.
- Se debe realizar un mínimo de seis recorridos en una misma ruta, tres sin la intervención y tres de prueba.
- Las condiciones climáticas en los recorridos registrados deben ser semejantes, admitiendo una variación en la temperatura promedio de 16,7 [°C] y variaciones en la velocidad del viento promedio de 8,05 [km/h].

4. Metodología

4.1. Determinar el consumo de combustible de los equipos seleccionados en función de las condiciones operacionales

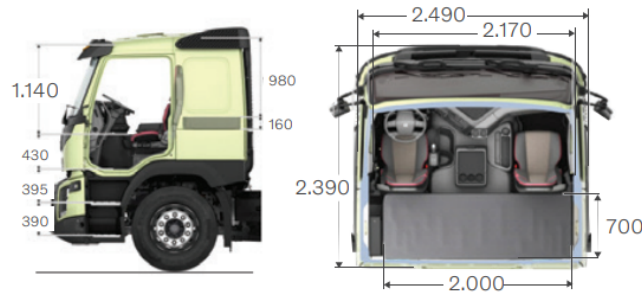
4.1.1. Equipos e Instrumentos

Como se explicó en la Sección 1.2, las pruebas se realizaron en cuatro camiones de transporte de troncos de madera, los cuales circulan en las rutas características de esta área de la empresa, rutas de la cordillera de la costa, de punto de origen la comuna de Arauco, y las rutas en carretera en la depresión intermedia, con el punto de origen la comuna de Chillán.

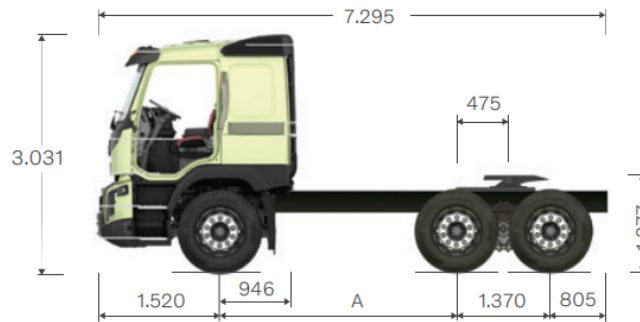
Los cuatro vehículos son del mismo modelo, siendo camiones VOLVO FMX460, los cuales presentan las siguientes características:

Tabla 14: Ficha técnica camiones intervenidos [45].

Motor	
Cilindrada:	12,8 [L]
N° Cilindros:	6
Potencia:	343 [kW]@1.400-1.900 [rpm]
Torque:	2.300[Nm]@1.000-1.400[rpm]
Caja de Velocidades	
Tipo:	Automatizada sin sincronizados
Sistema:	l-shift con soft HD
Marchas:	12 Velocidades
Tanque de Combustible	
Capacidad	450+450[L]
Diferencial	
Relación de reducción	3,61
Capacidad de arrastre	100 [ton]



((a)) Medidas cabina del camión



((b)) Medidas del camión sin carga

Figura 13: Características físicas de los camiones [45]



Figura 14: Imagen de los camiones estudiados.

Estos camiones poseen un sistema de telemetría satelital propio de su marca, denominado “VOLVO CONNECT”, este sistema permite medir los factores operacionales, los cuales pueden reflejar la condición de operación del recorrido, la condición de la ruta o ser referencial, es decir, permite clasificar la información de forma cualitativa. Además, esta plataforma permite medir el consumo de combustible promedio del camión, siendo este el **Indicador Principal**.

La información entregada por este sistema es el siguiente:

Tabla 15: Variables entregadas por el sistema de telemetría

Variable	Descripción	Tipo de factor
Fecha	Identifica cuándo fue el recorrido realizado	Referencial, permite determinar si el recorrido se realizó con oxihidrógeno
Vehículo	Identifica el vehículo	Referencial, permite identificar el vehículo, y por ende la zona
Tiempo total	Tiempo total de operación [hh:mm]	Referencial, si el tiempo recorrido fue demasiado corto, se considera un recorrido no válido
Distancia total	Distancia total recorrida [km]	Referencial, si la distancia recorrida fue demasiada corta, se considera un recorrido no válido
Diésel con motor en marcha	Diésel total consumido por el motor del vehículo [L]	Referencial, junto con la distancia total permitirá identificar anomalías en la medición
Promedio de diésel con motor en marcha	Consumo promedio de combustible del recorrido [L/100km]	Indicador principal, debido que permite estandarizar el consumo de combustible
Promedio de conducción	Velocidad promedio del vehículo [km/h]	Condición de ruta, dado que conociendo el sector de operación y la velocidad promedio del vehículo, se puede deducir la condición del tráfico del día
Ralentí	Porcentaje del tiempo operado que se trabajó en ralentí, es decir, estar con el motor encendido pero sin movimiento [%]	Condición de ruta, complementa a la velocidad para deducir la condición del tráfico del día
PTO	Porcentaje del tiempo operado el cual un accesorio del vehículo tomó energía del motor [%]	Condición operacional
En punto muerto	Porcentaje del tiempo operado en que el motor estuvo encendido pero no transmitió energía al vehículo [%]	Condición operacional
Programador de velocidad	Porcentaje del tiempo operado en que se utilizó esta función, la cual permite conducir a una velocidad constante sin necesidad de accionar el acelerador [%]	Condición operacional

4.1.2. Definición de las Condiciones Operacionales Características

Si bien todos los vehículos operan en rutas similares (por sector), el trabajo de cada recorrido varía según las condiciones de la ruta, por lo que se debe encontrar una forma de caracterizar las operaciones a partir de los datos entregados. Para esto, se rescata del trabajo de Gong, J, et al y Mills, S, A, et al [42,43], la aplicación de metodologías de aprendizaje automático o *Machine Learning* para caracterizar fenómenos multifactoriales, como el consumo de combustible en terreno de un vehículo. Profundizando en el trabajo de Mills, S, A, et al [43], en este se utiliza una técnica del análisis de los componentes principales o PCA, una metodología que permite evaluar el impacto de distintos factores en una variable de interés, siendo en este caso el consumo de combustible.

El análisis de componentes principales (PCA) es una herramienta estadística utilizada para reducir la dimensionalidad de los datos, mientras se conserva la mayor parte posible de la variación presente en el conjunto original. Esta técnica transforma el conjunto de variables correlacionadas en un nuevo conjunto de variables no correlacionadas llamadas “**Componentes Principales**” [43].

Los componentes principales es una combinación lineal de las variables originales, donde el primer componente captura la mayor parte de la varianza de los datos, el segundo captura la segunda mayor varianza, y así sucesivamente. Esta transformación se realiza mediante la *Matriz de Covarianza*, de la cual se obtienen los **Autovalores**, los que indican la cantidad de varianza que explica cada componente, y los **Autovectores**, los que indican la dirección de los nuevos ejes del espacio reducido [43].

Matemáticamente, el proceso se realiza de esta manera:

1. Estandarización de datos: Debido a que los datos utilizados pueden estar en diferentes escalas, se estandarizan para estar en media cero y desviación estándar uno. Esto se representa con la Ecuación (8) [46]

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \mu_j}{\sigma_j} \quad (8)$$

Donde Z_{ij} es el valor del dato i para la variable j , μ_j es el promedio de la variable j y σ_j es la desviación estándar de la variable j .

2. Matriz de covarianza: Con el conjunto de datos estandarizados, se calcula la matriz de covarianza, mediante la Ecuación (9) [46]:

$$C = \frac{1}{n-1} Z^T Z \quad (9)$$

Donde Z es la matriz de datos estandarizados y n es el número de observaciones.

3. Descomposición espectral: De la matriz de covarianza se resuelve el problema de los autovalores mediante la Ecuación (10) [46], así obteniendo los componentes y direcciones principales.

$$Cv_k = \lambda_k v_k \quad (10)$$

Donde v_k es el k -ésimo autovector, siendo el componente principal.

Dicho esto, hay un algoritmo de *Machine Learning* que utiliza de base la metodología PCA y permite agrupar los datos entregados en grupos característicos, denominado como “*Clusters*”. Estos algoritmos se definen como “**KMEANS**”.

Los algoritmos K-Means son técnicas computacionales simples que buscan agrupar la información entregada de tal forma que la suma de las distancias entre los puntos de un grupo y su centro sea mínima. Esto se representa por la ecuación (11) [46]:

$$J = \sum_{k=1}^K \sum_{i \in C_k} \|x_i - \mu_k\|^2 \quad (11)$$

Donde J es la función objetivo que el algoritmo busca minimizar, k es el número de clusters, C_k representa el conjunto de puntos que pertenecen al cluster k , x_i es el vector de datos del punto i , μ_k es el centroide del cluster k y $\|x_i - \mu_k\|^2$ es la distancia euclidiana al cuadrado entre el punto X_i y su centroide correspondiente.

Estos algoritmos se basan en un proceso iterativo, siguiendo los siguientes pasos:

1. Escalar los datos y definir los componentes principales, con esto se trabajará en las dos primeras dimensiones (los dos primeros componentes principales).
2. Especificar el número de clusters deseados (k). Estos son los conjuntos de datos o los grupos que clasifican la información. Estos son representados por un centro o centroide. Hay varias formas de determinar el número de clusters, la mas común es el "Método del Codo". Un método gráfico que toma la data original Y va creando clusters e indicando la distancia de los puntos a este. Mediante la gráfica uno determina el número óptimo de centros, considerando que si muchos, el programa exigirá más memoria computacional.

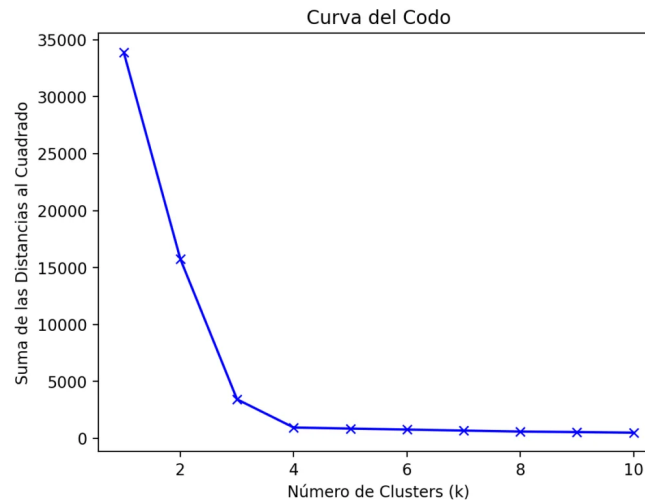


Figura 15: Ejemplo método del codo [47]

En la Figura 15 se muestra un ejemplo de un análisis del método del codo, donde se puede apreciar que después de 3 clusters la distancia entre puntos no varía demasiado, por lo que se utilizan 3 centros.

3. Seleccionar puntos al azar para que sean los centros iniciales.
4. Asignar cada punto del conjunto de datos al cluster cuyo centro esté más cercano.
5. Recalcular los centroides de cada cluster como la media de todos los clusters.
6. Repetir los puntos 4 y 5.

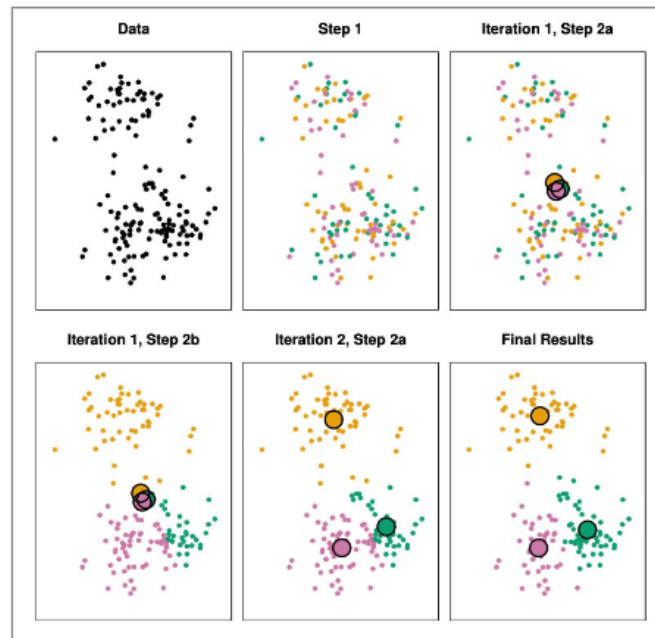


Figura 16: Ejemplo KMEANS [46]

Para desarrollar el primer objetivo se diseñará un algoritmo que semi automatiza el proceso de agrupar la información entregada en grupos de condiciones operacionales características o “**Modo de Operación**”. De estos modos de operación se definirá el consumo de combustible característicos de estos.

Se obtuvieron **1.060** informes del rendimiento semanal de los 35 vehículos que circulan por el área de Arauco y Chillán, evaluando su desempeño desde noviembre del 2022 hasta abril del 2023. De estos informes se obtienen las variables explicadas en la Tabla 15 vista en la Sección **5.1.1.**

Primero se filtra de forma manual la información entregada, seleccionando los vehículos estudiados según su código de identificación, quedando con **27** informes de rendimiento para los cuatro vehículos (108 informes en total). Estos son los que se denominaron como “Datos brutos”. Estos datos se dividieron por sector de operación (Arauco y Chillán), y fueron filtrados según los factores referenciales. De la información entregada por cada sector se realizó un PCA para determinar cual de los factores operacionales y de ruta entregados por la plataforma de VOLVO CONNECT tienen un impacto significativo en el consumo de combustible en los vehículos de cada sector.

Para esto se crea un algoritmo en la plataforma “Rstudio” que permite realizar esta tarea. La forma de programación de este algoritmo se representa en la Figura 17.

Determinando las variables con mayor impacto en el consumo de combustible, se utilizan estas para caracterizar los modos de operación de los vehículos definidos. Para esto se creó un algoritmo en la plataforma “Rstudio” donde mediante la metodología KMEANS se definirán los clusters operacionales principales. La forma de programación de este algoritmo se presenta en la Figura 18.

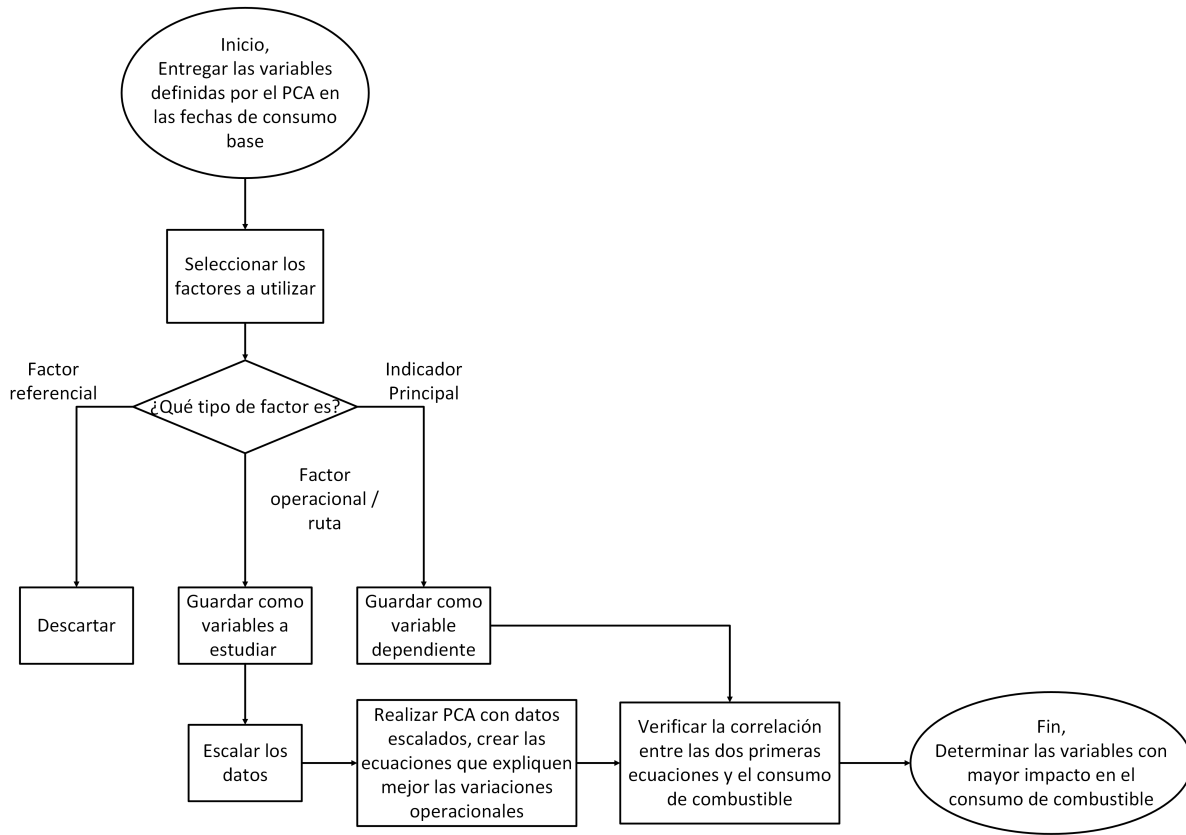


Figura 17: Diagrama de flujo código PCA

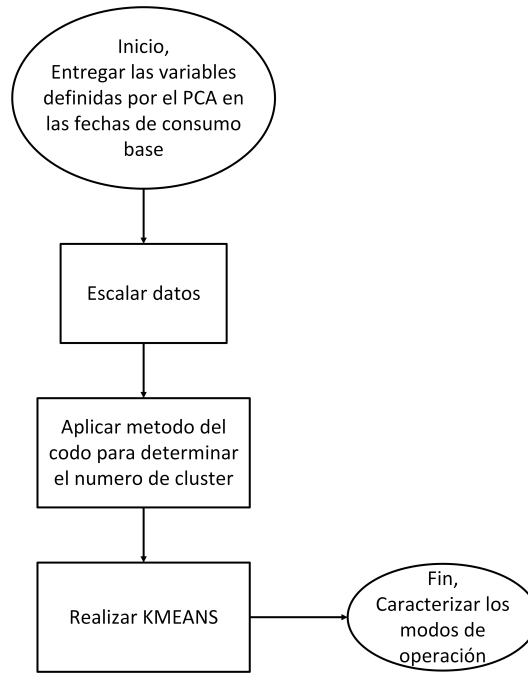


Figura 18: Diagrama de flujo código KMEANS

4.2. Medir la Diferencia del Consumo de Combustible de los Mismos Equipos tras la Intervención del Oxihidrógeno

4.2.1. Equipos e Instrumentos

Los vehículos fueron intervenidos con electrolizadores alcalinos comerciales, cuyas características técnicas son las siguientes:

Tabla 16: Ficha técnica equipos de electrólisis

Tipo:	Alcalino
Químico utilizado:	Hidróxido de Potasio (KOH)
Poder consumido:	180[W]
Entrada de Poder:	24[Vcc]; 7,5[A]
Producción Máxima:	0,7 [L/min]
Dimensiones:	507,5[mm]x246[mm]x605,6[mm]
Peso:	45[kg]

Los equipos funcionan absorbiendo energía del sistema eléctrico del camión, y con esta realiza la electrólisis creando el oxihidrógeno, el cual se inyecta en la admisión de aire del vehículo. Estos se conectan al camión por tres secciones, dos conexiones eléctricas, siendo una al sistema de baterías para obtener la corriente continua necesaria para la electrólisis, y otra que se conecta al alternador del camión, el cual entregará la señal de encendido, una señal eléctrica que activa el circuito interno del electrolizador y permite generar hidrógeno solo cuando el motor esta encendido. Por último está la conexión de gas, la cual se hace entre el filtro de aire y el turbocompresor del camión, aprovechando la succión generada por este para transportar el oxihidrógeno a la cámara de combustión. Esta operación se ve reflejada en la Figura 19.

Estos equipos poseen sensores internos que resguardan tanto la integridad del vehículo, como la del propio equipo, los cuales hacen que se detenga la producción de HHO si las condiciones no son optimas. Estos son dos sensores de nivel de agua los que se conectan al tanque de fluido principal y tanque secundario. El primero detecta si se debe recargar con agua destilada el equipo, y el segundo indica si el tanque secundario está saturado con agua mezclada con KOH, algo que puede ocurrir después de miles de horas de operación en el mejor de los casos, o después de una recarga mal realizada en el peor de los casos. La Figura 19 representa el circuito de conexiones que existe en este equipo y las conexiones a la admisión del aire y al sistema eléctrico del vehículo, en este se representa la *Unidad de Control Eléctrico* y el *Panel Eléctrico* como un relé electromagnético genérico, identificado como “CPU”, esto para simplificar las conexiones entre el alternador, la batería y los sensores de niveles ubicados en los tanques del equipo.

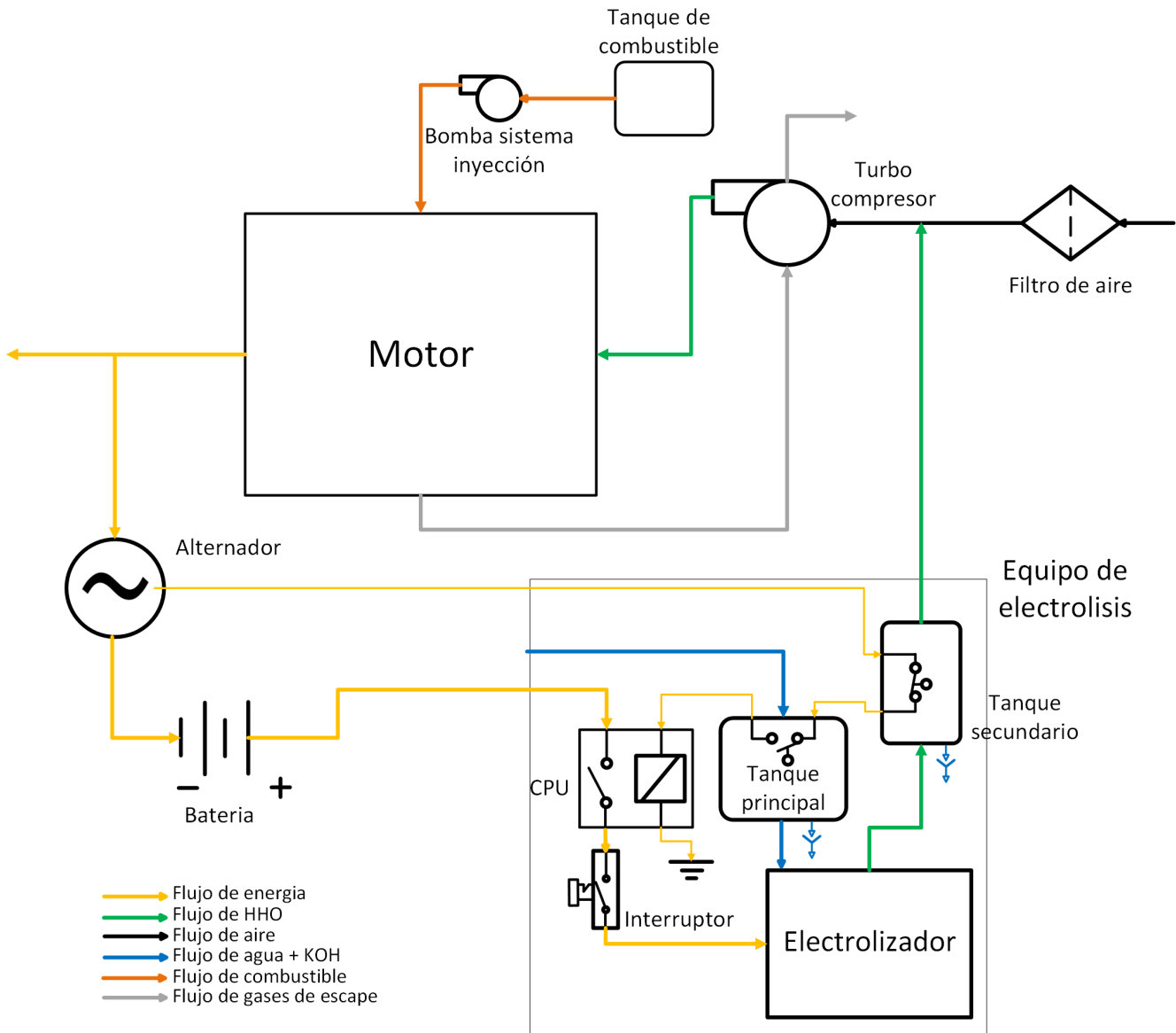


Figura 19: Circuitos de conexión del equipo de electrólisis. Creación propia

A continuación se presenta el listado de componentes internos y externos del equipo de electrólisis.

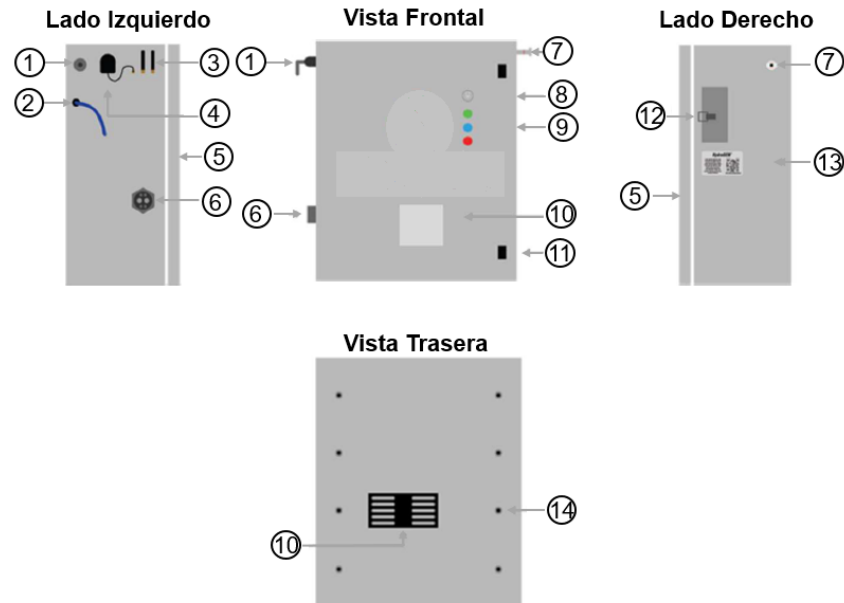


Figura 20: Exterior del equipo, obtenido del manual de usuario del equipo

Tabla 17: Componentes externos del equipo

N°	Nombre	Función
1	Línea de Gas	Conexión de gas entre el equipo y el vehículo
2	Liberación de Presión	Medida de protección para evitar una acumulación de HHO
3	Antena de Comunicación	Permite comunicar el estado del equipo al usuario
4	GPS	Permite compartir ubicación geográfica del equipo al usuario
5	Puerta	Protege los componentes internos del equipo
6	Conector de Poder	Entrada de energía eléctrica del equipo
7	Recarga KOH	Entrada utilizada para cargar el equipo con KOH
8	Interruptor Principal	Permite encender y apagar manualmente el equipo
9	Luces LED	Indican el estado del equipo
10	Entrada de Aire	Sistema de refrigeración
11	Cerradura de Puerta	Bloquea la puerta en posición
12	Panel de Recarga	Permite recargar el estanque principal de forma externa
13	Identificador de la Unidad	Permite identificar la unidad y hacer su seguimiento de forma remota
14	Agujeros para Montura	Permite fijar el equipo en la montura diseñada

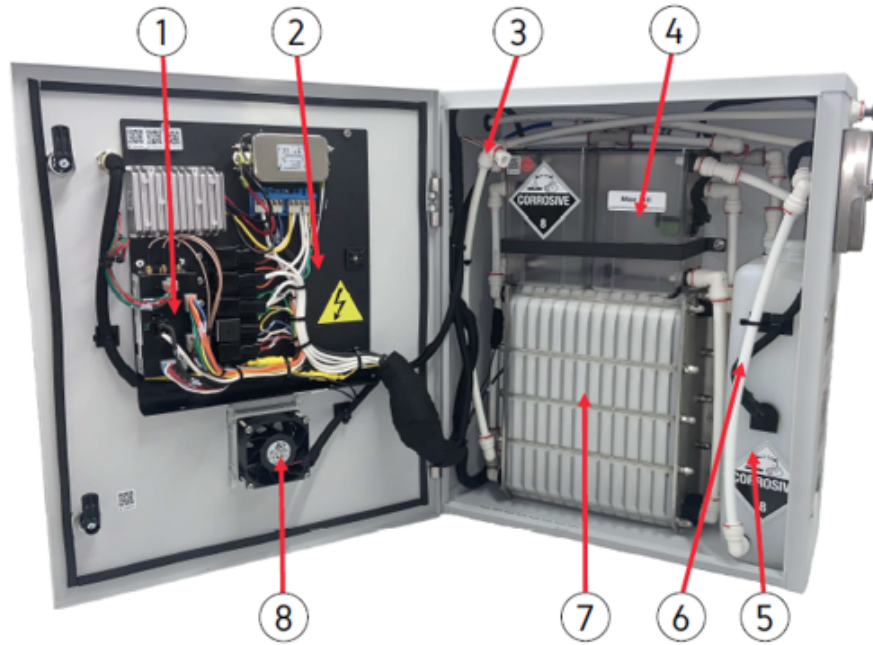


Figura 21: Interior del equipo, obtenido del manual de usuario del equipo

Tabla 18: Componentes internos del equipo

N°	Nombre	Función
1	Unidad de Control Eléctrico	Regula el funcionamiento del equipo según el estado de sus componentes
2	Panel Eléctrico	Recibe y suministra la energía eléctrica
3	Tubo de Drenaje	Permite drenar el tanque principal de forma segura
4	Tanque de Fluido Principal	Almacena la mezcla de agua destilada y KOH
5	Tanque secundario	Actúa como el “Bubbler” del equipo, filtrando el HHO producido
6	Drenaje Tanque Secundario	Permite drenar el tanque secundario de forma segura
7	Reactor	Equipo principal, genera la electrólisis
8	Ventilador	Sistema de refrigeración

Al igual que las fechas que no se inyecta HHO, durante el periodo de pruebas se utilizó el sistema de “VOLVO CONNECT” para medir las variables de referencia, de operación y de ruta, además del consumo de combustible en estas fechas.

4.2.2. Medir la Diferencia del consumo de combustible

Para realizar el segundo objetivo específico de este trabajo se obtuvieron **740** informes del rendimiento semanal de los 35 vehículos que circulan por el área de Arauco y Chillán, evaluando su desempeño desde abril del 2023 hasta agosto del mismo año. Estos informes presentan la misma información que los revisados en la Sección **6.1**.

Al igual que el primer objetivo específico, se inició el trabajo filtrando de forma manual la información entregada, seleccionando los vehículos estudiados, quedando con **19** informes de rendimiento para los cuatro vehículos (76 informes en total), siendo estos los “Datos brutos”.

Nuevamente se dividieron estos datos por sector de operación y por los factores referenciales; esta información se procesó mediante un algoritmo KMEANS, que a diferencia del diseñado para el objetivo específico 1, este asigna los datos entregados a los clusters definidos previamente, donde además de identificar las mismas condiciones operacionales, se filtran los recorridos atípicos. La forma de programación de este algoritmo se presenta en el siguiente diagrama de flujo:

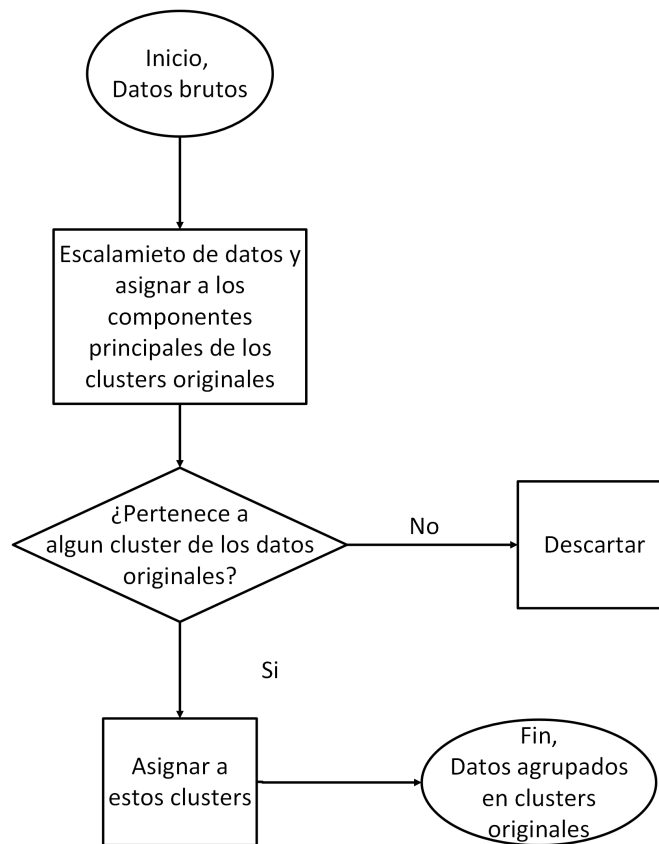


Figura 22: Diagrama de flujo código KMEANS 2

4.3. Evaluar la Factibilidad de Implementar esta Tecnología en otras Áreas de la Empresa

4.3.1. Factibilidad Técnica

Como parte del estudio de la factibilidad de implementar esta tecnología en otras áreas de la Empresa, se realizará un estudio de la factibilidad técnica de este proceso, donde se contrastará la información entregada por los proveedores y las observaciones reales del proceso de instalación y operación de los equipos en terreno. En esta sección se entregará la información entregada por el proveedor.

Los proveedores de los equipos de electrólisis promocionan esta tecnología como una solución de fácil instalación, sin necesidad de realizar modificaciones estructurales complejas, y con una vida útil estimada entre ocho y diez años bajo condiciones normales, considerando una baja demanda de mantenimiento.

La instalación indicada por los proveedores sugiere colocar esta tecnología sobre el chasis del camión, justo detrás de la cabina. Esto cumple la función de mantener el equipo nivelado en su posición vertical, siendo esta una condición operacional obligatoria según el fabricante. Además, desde esta posición el equipo se encuentra protegido de elementos externos al vehículo. En la Figura 23 se aprecia la instalación indicada por los proveedores.

Las tareas de mantenimiento indicadas por los proveedores son de baja demanda y añaden aproximadamente una hora de mano de obra al mes, las cuales se considera una recarga de agua destilada cada 80 horas de operación, una limpieza a la entrada de aire del ventilador una vez al mes, una inspección visual diaria y una recarga del KOH anual.

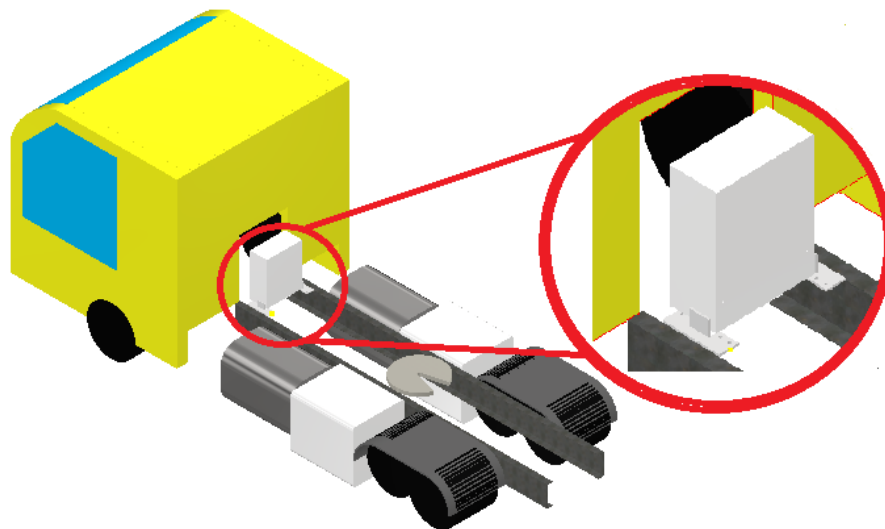


Figura 23: Maqueta virtual de la instalación indicada por el proveedor.

4.3.2. Factibilidad Económica

La otra parte del estudio de la factibilidad de implementar esta tecnología en otras áreas de la Empresa, se realizará mediante un estudio de la factibilidad económica, mediante un **Flujo de Caja**, un tipo de reporte financiero que permite visualizar el flujo de dinero para la Empresa durante un tiempo fijo, en este caso siendo la vida útil del equipo (8 años). El objetivo de este análisis es determinar si la inversión en esta tecnología resulta rentable en el mediano y largo plazo, considerando los costos de instalación y operación, y los beneficios derivados del ahorro de combustible.

Los costos considerados en los egresos de una implementación a gran escala son los siguientes:

- Costos de compra de equipos (Excluyendo IVA).
- Costos de instalación, considerando mano de obra, materiales y adaptaciones específicas que se visualizarán en la evaluación de la factibilidad técnica.
- Costos operativos, considerando el agua destilada, KOH y mantenimiento real, los que serán reflejados en el análisis de la factibilidad técnica.

El principal beneficio económico (ingreso) es el ahorro de combustible (resultado del segundo objetivo específico), el cual se extrapolará al resto de vehículos del Departamento de Transporte, y a los vehículos del Departamento de Caminos, área de la empresa donde se utilizan los mismos modelos de camiones y comparten patrones de operación.

Con los ingresos y egresos definidos se construirá el flujo de caja, y a partir de este se utilizarán los siguientes factores financieros:

- Valor Actual Neto (**VAN**): Indicador que representa el valor presente de los beneficios netos del proyecto, descontando flujos futuros a una tasa de interés definida.
- Tasa Interna de Retorno (**TIR**): Tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero.
- Periodo de Recuperación (**Payback**): Tiempo necesario para recuperar la inversión inicial.

Adicionalmente, se realizara un análisis de sensibilidad al riesgo, evaluando el efecto en el resultado económico las variaciones en parámetros clave, como el precio del combustible, los costos de mantenimiento, el ahorro de combustible y el precio del equipo de electrólisis. Además, se comparará la variación en el costo nivelado del vehículo por kilómetro recorrido antes y después de instalar el equipo.

Para el ultimo punto se utilizará la ecuación (12) y (13) [48], las cuales reflejaran el impacto del ahorro de combustible a un nivel operacional.

$$LCO_{original} = \frac{\$Operacional}{Kilometraje} \quad (12)$$

$$LCO_{HHO} = \frac{\$Operacional + CAPEX + OPEX - \$Ahorro}{Kilometraje} \quad (13)$$

Donde, $LCO_{original}$ es el costo nivelado del vehículo sin la intervención de la tecnología de HHO, $\$Operacional$ es el costo operacional [USD], LCO_{HHO} es el costo nivelado del equipo al instalar los equipos de HHO y $\$Ahorro$ es el ahorro en combustible [USD].

5. Resultados

5.1. Determinar el consumo de combustible de los equipos seleccionados en función de las condiciones operacionales

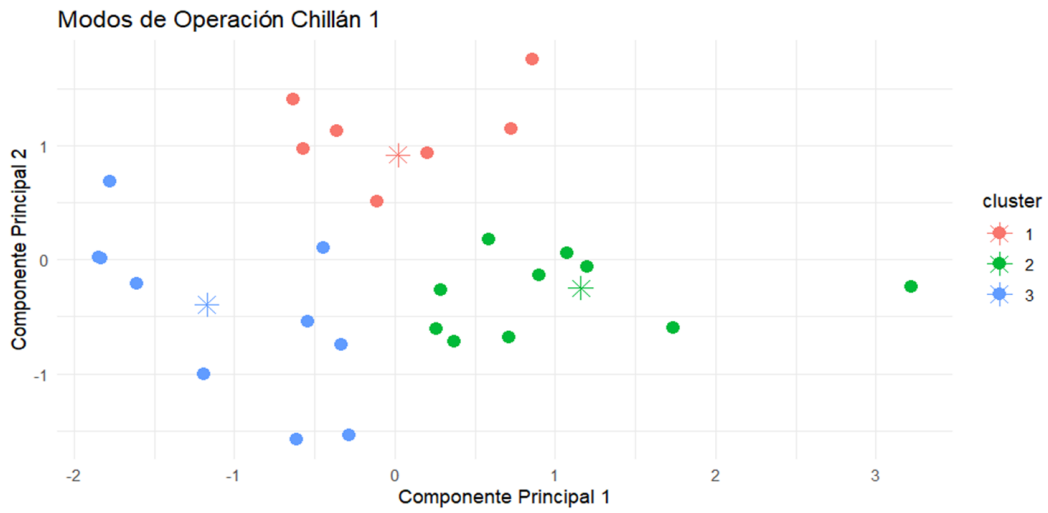
Aplicando los algoritmos especificados en la Sección 4.1.2. con la información entregada por los informes de rendimiento, se obtuvieron los siguientes resultados.

Para los vehículos de la zona Chillán se obtuvo que el segundo componente principal obtenido en el PCA tiene una correlación del 70 [%] con el consumo de combustible, siendo la más alta de todos los componentes principales.

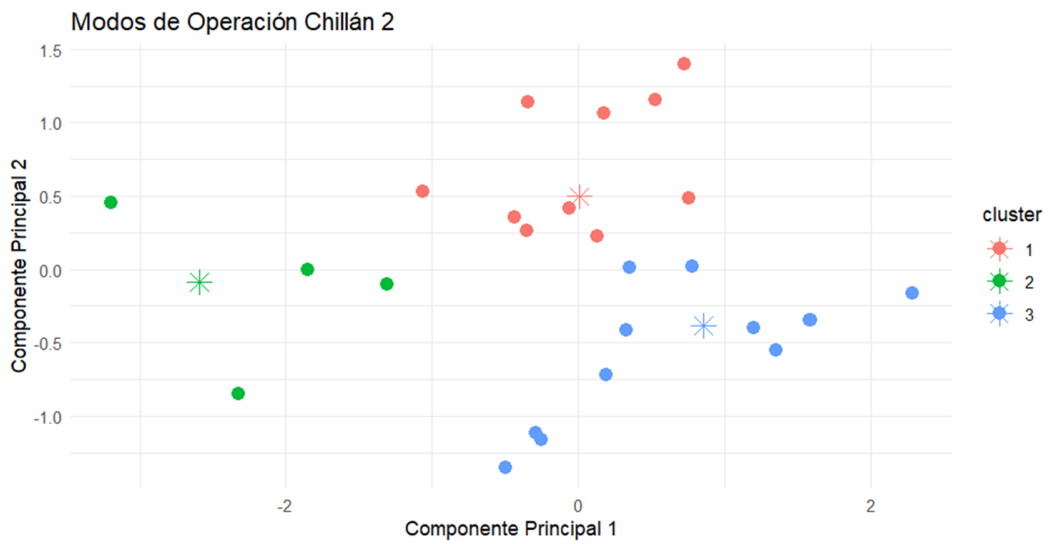
Las variables que tienen más peso en este componente principal son el **Promedio de conducción** [km/h] y el **Programador de Velocidad** [%]. Esto coincide con el hecho de que los vehículos de este sector circulan principalmente por carretera, a velocidades más altas y utilizan más el programador de velocidad, y no se ven enfrentados a condiciones adversas.

De los vehículos de la zona de Arauco se obtuvo que el primer componente principal tiene una correlación del 73 [%] con el consumo de combustible, con el **Promedio de conducción** [km/h], **Ralentí** [%] y **En punto muerto** [%] como las variables con más peso en este. Nuevamente esto concuerda con el hecho de que estos vehículos se enfrentan rutas más complejas, por lo que el uso del programador de velocidad disminuye drásticamente, al no estar las condiciones que permiten que este se mantenga activo. Por lo demás, aumentan las paradas y los cambios de marcha debido a los juegos de pendiente en la operación, lo que se ve reflejado en el porcentaje de ralentí y de tiempo en el punto muerto del vehículo.

Aplicando estas variables en el algoritmo KMEAN diseñado, se presentan los siguientes **Modos Operacionales**:

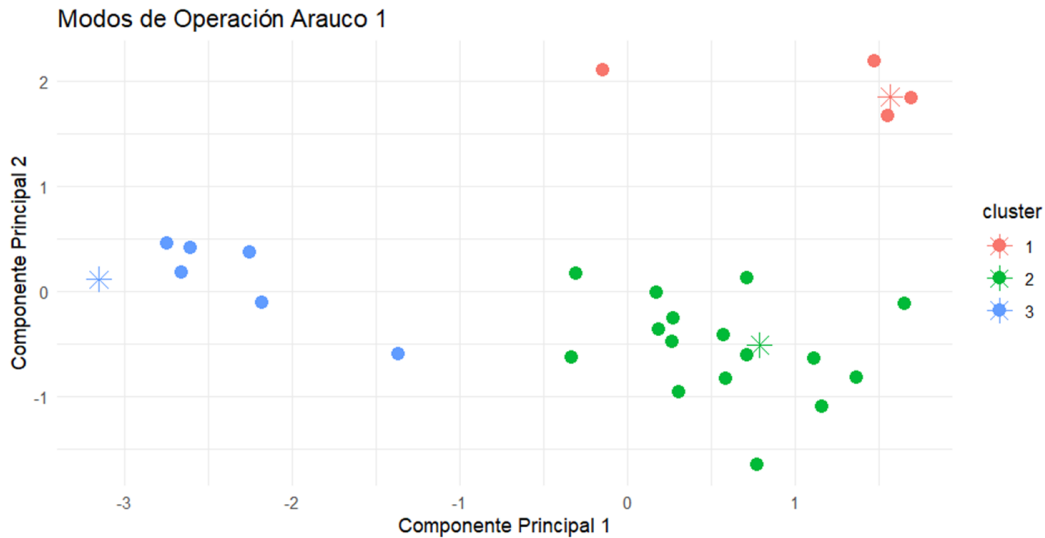


((a)) Modos de operación Camión Chillán 1

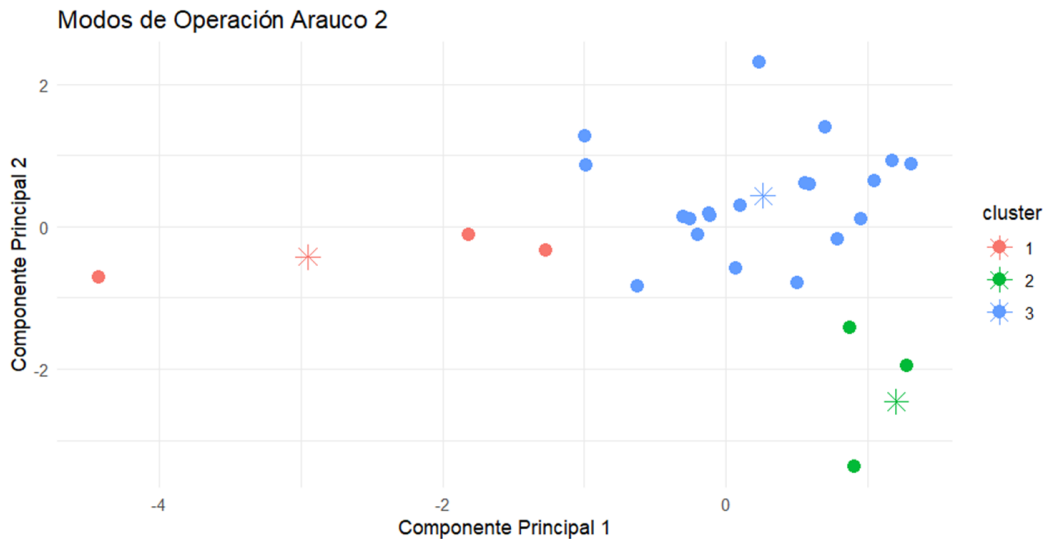


((b)) Modos de operación Camión Chillán 2

Figura 24: Resultados algoritmo KMEANS en la línea base de los vehículos sector Chillán



((a)) Modos de operación Camión Arauco 1



((b)) Modos de operación Camión Arauco 2

Figura 25: Resultados algoritmo KMEANS en la línea base de los vehículos sector Arauco

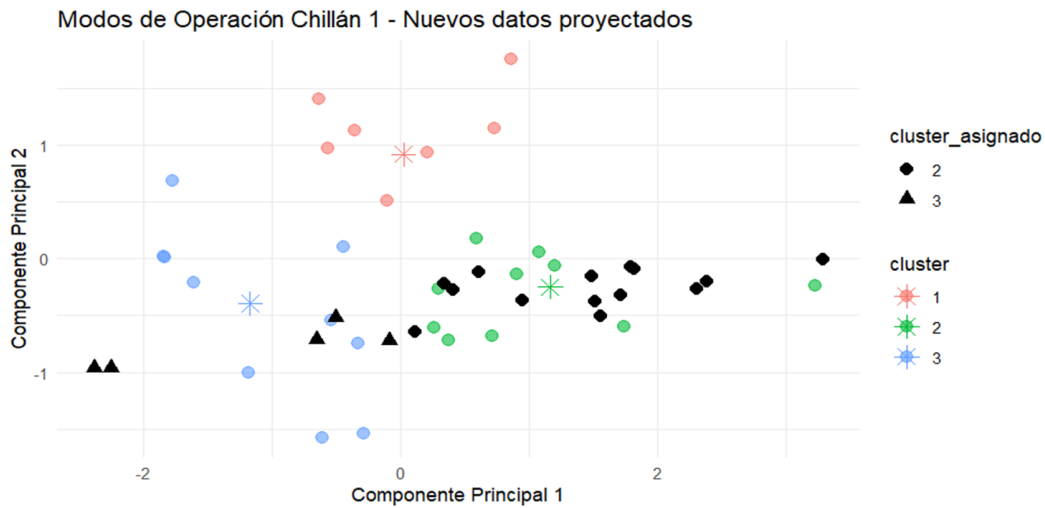
- **Camión Chillán 1:** Este vehículo circula con una velocidad promedio de 55 [km/h] y un porcentaje promedio del uso del programador de velocidad del 35 [%]. Aplicando el algoritmo KMEANS se obtuvieron los siguientes modos operacionales:
 1. Modo de operación 1: Estas son las operaciones donde se circuló a velocidades por sobre el promedio, alrededor de 60 [km/h] y el porcentaje de uso del programador de velocidad está bajo del 30 [%].
Bajo estas condiciones operacionales este vehículo presenta un **Consumo de Combustible Promedio de 40,45 [L/100km]**.
 2. Modo de operación 2: Estas son las operaciones donde se circuló a velocidades similares al promedio, pero con un porcentaje de uso del programador de velocidad por sobre el 40 [%].
Bajo estas condiciones operacionales este vehículo presenta un **Consumo de Combustible Promedio de 41,26 [L/100km]**.

3. Modo de operación 3: Estas son las operaciones donde se circuló a velocidades por debajo del promedio, alrededor de 50 [km/h], y el porcentaje de uso del programador de velocidad es similar al promedio.
Bajo estas condiciones operacionales este vehículo presenta un **Consumo de Combustible Promedio** de **42,17 [L/100km]**.
- **Camión Chillán 2:** Este vehículo circula con una velocidad promedio de 53 [km/h] y un porcentaje de uso de programador de velocidad del 30 [%]. Aplicando el algoritmo KMEANS se obtuvieron los siguientes modos de operación:
 1. Modo de operación 1: Estas son las operaciones donde se circuló a velocidades y porcentajes del uso de programador de velocidad similares al promedio.
Bajo estas condiciones operacionales este vehículo presenta un **Consumo de Combustible Promedio** de **42,56 [L/100km]**.
 2. Modo de operación 2: Estas son las operaciones donde se circuló a velocidades menores del promedio, alrededor de 48 [km/h], y el porcentaje del uso de programador de velocidad es del 20 [%].
Bajo estas condiciones operacionales este vehículo presenta un **Consumo de Combustible Promedio** de **47,17 [L/100km]**.
 3. Modo de operación 3: Estas son las operaciones donde se circuló a velocidades similares al promedio, pero con un porcentaje de uso del programador de velocidad del 36 [%].
Bajo estas condiciones operacionales este vehículo presenta un **Consumo de Combustible Promedio** de **43,89 [L/100km]**,
 - **Camión Arauco 1:** Este vehículo circula con una velocidad promedio de 54 [km/h], con un porcentaje de tiempo en ralentí de 10,68 [%] y en punto muerto de 8,18 [%].
 1. Modo de operación 1: Estas son las operaciones donde se circuló a velocidades menores al promedio, alrededor de 47 [km/h], con un porcentaje de tiempo cercano al promedio, pero el tiempo en punto muerto aumenta a un 12 [%].
Bajo estas condiciones el vehículo presenta un **Consumo de Combustible Promedio** de **48,42 [L/100km]**.
 2. Modo de operación 2: Estas son las operaciones donde se circuló a velocidades y el porcentaje del tiempo en punto muerto son cercanos al promedio, pero el tiempo en ralentí aumenta a un 13[%].
Bajo estas condiciones el vehículo presenta un **Consumo de Combustible Promedio** de **46,93 [L/100km]**.
 3. Modo de operación 3: Estas son las operaciones donde se circuló a velocidades sobre el promedio, alrededor de 69 [km/h], con una disminución del porcentaje de tiempo en ralentí y en punto muerto, siendo de 6,8 [%] y 6,6 [%] respectivamente.
Bajo estas condiciones el vehículo presenta un **Consumo de Combustible Promedio** de **36,29 [L/100km]**.

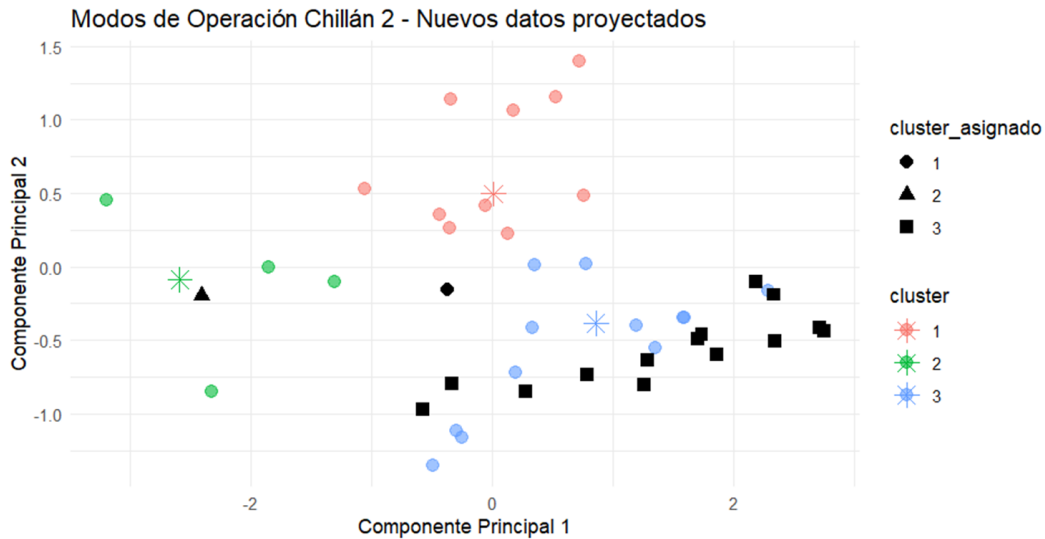
- **Camión Arauco 2:** Este vehículo circula con una velocidad promedio de 47 [km/h], con un porcentaje de tiempo en ralentí de 10,85 [%] y en punto muerto de 10,8 [%].
 1. Modo de operación 1: Estas son las operaciones donde se circuló a velocidades sobre el promedio, alrededor de 56 [km/h], el porcentaje de tiempo en punto muerto cerca del promedio, y con una disminución del porcentaje de tiempo en ralentí, siendo de 8,12 [%].
Bajo estas condiciones el vehículo presenta un **Consumo de Combustible Promedio** de **40,53 [L/100km]**.
 2. Modo de operación 2: Estas son las operaciones donde se circuló a velocidades menores al promedio, alrededor 42 [km/h], con una disminución del porcentaje de tiempo en ralentí, alrededor de 8,3 [%] y un aumento del porcentaje de tiempo en punto muerto, alrededor de 13,72 [%].
Bajo estas condiciones el vehículo presento un **Consumo de Combustible Promedio** de **51,61 [L/100km]**.
 3. Modo de operación 3: Estas son las operaciones donde el tiempo en punto muerto y las velocidades poseen valores cercanos al promedio, pero se presenta un aumento en el tiempo de ralentí del orden del 12 [%].
Bajo estas condiciones el vehículo presenta un **Consumo de Combustible Promedio** de **49,95 [L/100km]**.

5.2. Medir la Diferencia del Consumo de Combustible de los Mismos Equipos tras la Intervención del Oxihidrógeno

Aplicando el algoritmo especificado en la Sección 4.2.2. se pudo asignar los datos obtenidos en los informes de rendimiento de los vehículos en la fecha que se utilizó oxihidrógeno en los modos de operación descritos previamente. Esto permite evaluar la diferencia en el consumo de combustible bajo las mismas condiciones operacionales.

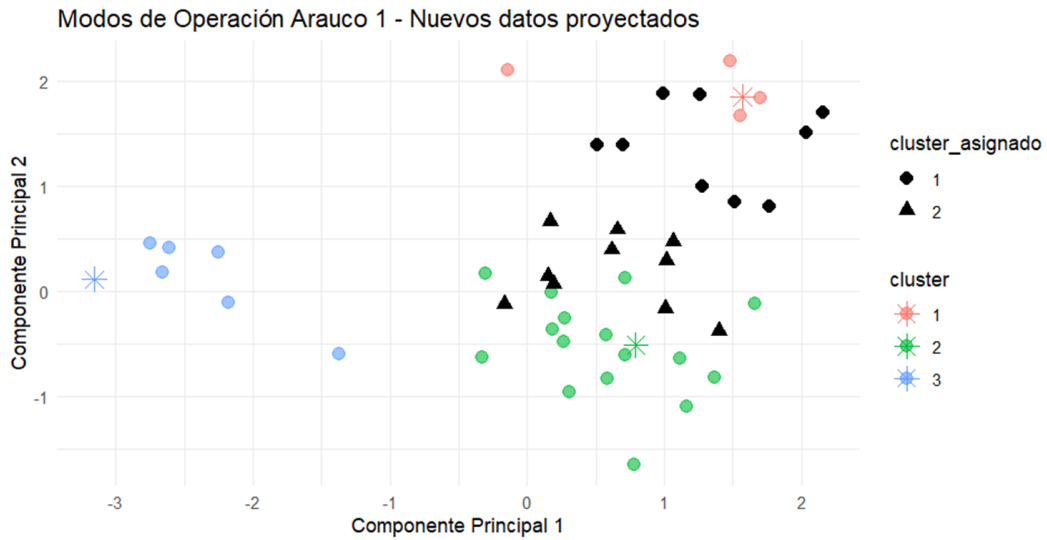


((a)) Asignación de datos HHO a los modos de operación del camión Chillán 1

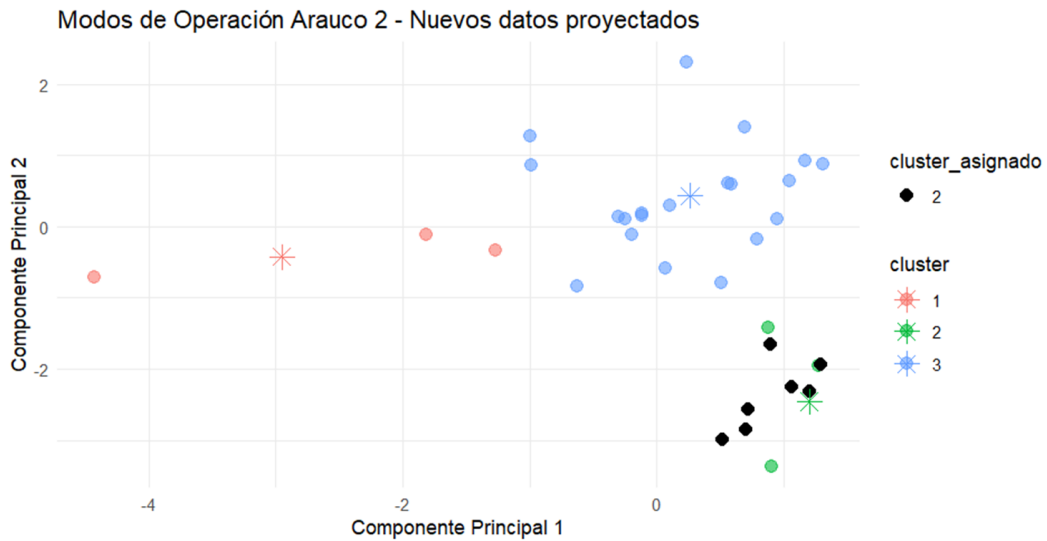


((b)) Asignación de datos HHO a los modos de operación del camión Chillán 2

Figura 26: Asignación de datos línea HHO a los modos de operación de los vehículos sector Chillán



((a)) Asignación de datos HHO a los modos de operación del camión Arauco 1



((b)) Asignación de datos HHO a los modos de operación del camión Arauco 2

Figura 27: Asignación de datos línea HHO a los modos de operación de los vehículos sector Arauco

Tabla 19: Diferencias en el consumo de combustible del camión Chillán 1

Modo de operación	Consumo combustible línea base [L/100km]	Consumo de combustible línea HHO [L/100km]	Ahorro [%]
2	41,26	39,23	4,90
3	42,17	40,50	3,96
Ahorro Promedio del vehículo			4,43 [%]

Tabla 20: Diferencias en el consumo de combustible del camión Chillán 2

Modo de operación	Consumo combustible línea base [L/100km]	Consumo de combustible línea HHO [L/100km]	Ahorro [%]
3	43,89	41,93	4,46
Ahorro Promedio del vehículo			4,46 [%]

Tabla 21: Diferencias en el camión Arauco 1

Modo de operación	Consumo combustible línea base [L/100km]	Consumo de combustible línea HHO [L/100km]	Ahorro [%]
1	48,42	45,83	5,35
2	46,93	46,90	0,08
Ahorro Promedio del vehículo			2,72 [%]

Tabla 22: Diferencias en el camión Arauco 2

Modo de operación	Consumo combustible línea base [L/100km]	Consumo de combustible línea HHO [L/100km]	Ahorro [%]
2	51,61	46,24	10,40
Ahorro Promedio del vehículo			10,40 [%]

De estos resultados se destaca lo siguiente:

- Para los vehículos de la zona de Chillán, caracterizados por circular en carreteras pavimentadas de poca pendiente, se presentó un ahorro promedio de consumo de combustible del **4,44 [%]**, con un intervalo de confianza de 0,54 [%].
- Para los vehículos de la zona de Arauco, caracterizados por circular tanto en rutas pavimentadas empinadas y caminos forestales, presentó un ahorro promedio de consumo de combustible del **5,16 [%]**, con un intervalo de confianza de 5,84 [%].

5.3. Evaluar la factibilidad de implementar esta tecnología en otras áreas de la empresa

Debido al uso de vehículos del mismo modelo y presentar condiciones operacionales similares a las revisadas en esta prueba piloto, se evaluará el implementar la tecnología de electrólisis en los vehículos del Departamento de Caminos. Estos se sumarán a los vehículos del Departamento de Transporte, quedando así una flota de 50 camiones.

El Departamento de Caminos es el área de la Empresa encargada de construir los caminos forestales en los terrenos de esta. Este departamento posee una flota de 25 camiones tipo tolva (Volvo FMX 460), los cuales realizan el trabajo de transportar áridos. Dependiendo de la época del año, estos camiones realizan operaciones iguales a los vehículos del sector Chillán o del sector Arauco.

5.3.1. Factibilidad Técnica

Como se explica en la Sección 5.3.1. para evaluar la factibilidad técnica de esta implementación se contrastará la información entregada por el fabricante y la observada en la prueba piloto.

1. **Instalación:** Como se explico anteriormente, los proveedores promocionan esta tecnología como de fácil instalación, pero debido al espacio disponible en los vehículos, se debe realizar un trabajo más dedicado.

Para los camiones del Departamento de Transporte no se encuentra el espacio para los equipos detrás de la cabina, dado a su “Escudo”, por lo que se diseñó una jaula donde se instaló el equipo de electrólisis y esta quedo colgando al lado del tanque de combustible.



Figura 28: Escudo protector de cabina

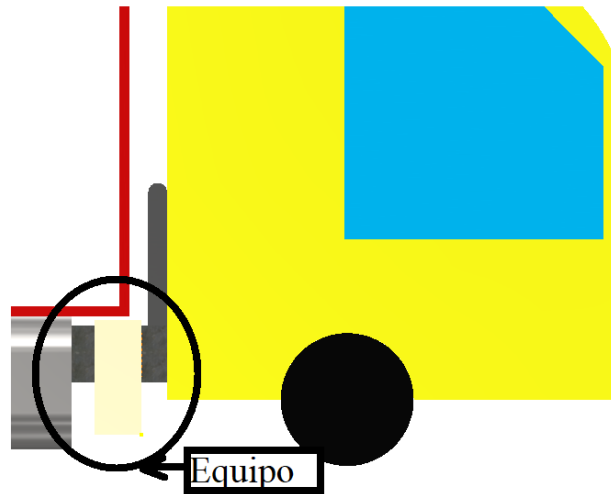


Figura 29: Esquema de instalación realizada en la prueba

En los vehículos del Departamento de Caminos si se encuentra disponible un espacio detrás de la cabina, apoyado en la viga que soporta el sistema hidráulico de la tolva. Para ambas instalación se debe invertir en amortiguaciones de goma para evitar los daños de las vibraciones, esto sera reflejado en la evaluación de la factibilidad económica.

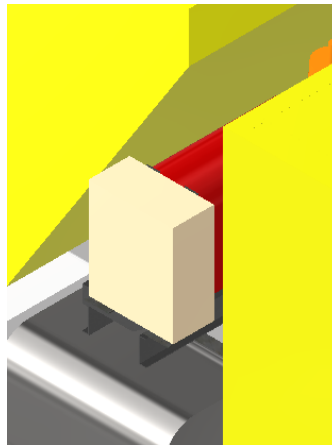


Figura 30: Esquema de instalación para camiones tolvas

- Operación:** De acuerdo a las instrucciones entregadas con los proveedores, durante las pruebas se recargo con cinco litros de agua destilada una vez a la semana, durante los meses de prueba no se tuvo que recargar de KOH, lo que va de la mano con lo indicado por el proveedor, y se consideraron un aumento de dos horas al plan de mantenimiento mensual, lo que se considerará en la evaluación económica.

La mayor diferencia de la información entregada por los proveedores con la observada en las pruebas fue la longevidad de los equipos. Al terminar el piloto se reviso el estado de los vehículos y se destaco lo siguiente:

De los vehículos que operaron en el sector de Chillán, los que circularon en rutas similares a las diseñadas para los equipos, uno de estos presento daños por las vibraciones, donde los remaches del panel eléctrico se cortaron, dejando colgando este elemento y dañando los componentes eléctricos.



Figura 31: Daños presentes en equipo instalado en vehículo sector Chillán

Por otra parte, los equipos instalados en los vehículos de la zona de Arauco presentaron daños mayores. Uno de estos equipos presenta la misma causa raíz que el equipo instalado en la zona de Chillán, siendo que los remaches del panel eléctrico se cortaron por las vibraciones, pero hubieron daños más graves, siendo que el panel golpeó el tanque de fluido principal, creando una fuga de mezcla de agua destilada y KOH, siendo este químico altamente corrosivo, lo que destruyó los componentes eléctricos internos, estos daños si bien son reparables, el costo de mantenimiento es elevado. El segundo equipo instalado en este sector presentó una falla total, producto de un accidente que tuvo el vehículo, lo que provocó un impacto de gran magnitud que terminó destruyendo por completo el tanque de fluido principal.



((a)) Fuga del tanque de fluido principal



((b)) Equipo con pérdida total

Figura 32: Daños presentes en los equipos instalados en sector Arauco

Debido a los daños observados en los equipos instalados en los vehículos de Arauco, además de la alta variabilidad del ahorro de combustible, se considera que los equipos deben instalarse únicamente en vehículos que circulen en carreteras, como los del sector de Chillán.

5.3.2. Factibilidad Económica

■ Costos:

1. Equipo de electrólisis: El equipo probado presenta un precio comercial unitario de **7.500 [USD]**, más el costo de envío unitario de **900 [USD]**.
2. Diseño de estructura de montaje: La fabricación e instalación de una estructura especializada presenta un costo de **650 [USD]** por equipo.
3. Agua destilada: Cada vehículo presenta un consumo de agua destilada anual de 237 [L], lo que implica un costo anual de **100 [USD]** por vehículo intervenido.
4. KOH: Cada vehículo consume 4 [kg] de KOH al año, lo que implica un costo anual de **785 [USD]** por vehículo intervenido.
5. Operacionales: Si bien en las pruebas se vio un aumento de dos horas en el plan de mantenimiento mensual, se agregara un costo anual de reparaciones a las fijaciones de los equipos de **500 [USD]**.

Considerando una inversión para una flota de 50 camiones, incluyendo los vehículos del Departamento de Caminos y de Transporte, se tienen los siguientes gastos:

CAPEX: 454.500 [USD].

OPEX: 69.000 [USD].

■ Ingresos:

Ahorro de combustible del 4,44 [%] en los vehículos del Departamento de Transporte y Caminos, los cuales presentan las siguientes características:

• Caminos:

Distancia anual recorrida: **53.000 [km/Camión*año]**.

Consumo de combustible anual: **49.000 [L/Camión*año]/49.000 [USD/Camión*año]**

Ahorro: 2.180 [USD/Camión*año]

• Transporte:

Distancia anual recorrida: **160.000 [km/Camión*año]**.

Consumo de combustible anual: **75.000 [L/Camión*año]/73.600 [USD/Camión*año]**.

Ahorro: 3.250 [USD/Camión*año].

Con estos ingresos y egresos descritos, se plantea el siguiente flujo de caja:

Flujo de caja									
Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8
CAPEX	\$ 454.500,00								
OPEX	-	\$ 68.990,00	\$ 68.990,00	\$ 68.990,00	\$ 68.990,00	\$ 68.990,00	\$ 68.990,00	\$ 68.990,00	\$ 68.990,00
Ahorro	-	\$ 136.086,00	\$ 136.086,00	\$ 136.086,00	\$ 136.086,00	\$ 136.086,00	\$ 136.086,00	\$ 136.086,00	\$ 136.086,00
Flujo de caja	\$ -454.500,00	\$ 67.096,00	\$ 67.096,00	\$ 67.096,00	\$ 67.096,00	\$ 67.096,00	\$ 67.096,00	\$ 67.096,00	\$ 67.096,00
Total	\$ -454.500,00	\$ -387.404,00	\$ -320.308,00	\$ -253.212,00	\$ -186.116,00	\$ -119.020,00	\$ -51.924,00	\$ 15.172,00	\$ 82.268,00

Figura 33: Flujo de caja

En este caso el proyecto no es rentable, siendo que presenta un **VAN** con una tasa de descuento del 10 [%] de **-97.000 [USD]**, con un **TIR** del 4 [%] y un **Payback** de **6,7 [años]**.

Analizando la propuesta presentada, se puede notar que los vehículos del Departamento de Caminos no presentan un consumo de combustible tan elevado como el del Transporte, por lo que si hay una disminución de este, el retorno económico no justifica la inversión. Es por este motivo que se descarta la implementación de esta tecnología a otros departamentos de la empresa, por lo que se reformula el proyecto, disminuyendo el número de vehículos intervenidos de 50 a 25, siendo solamente los del Área de Transporte, y agregando un aumento a la inversión de montaje a 1000 [USD] por vehículo, con el fin de disminuir los costos de mantenimientos. La proyección de esta implementación se ve reflejado de la siguiente manera:

Flujo de caja									
Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8
CAPEX	\$ 236.000,00								
OPEX	-	\$ 29.495,00	\$ 29.495,00	\$ 29.495,00	\$ 29.495,00	\$ 29.495,00	\$ 29.495,00	\$ 29.495,00	\$ 29.495,00
Ahorro	-	\$ 81.696,00	\$ 81.696,00	\$ 81.696,00	\$ 81.696,00	\$ 81.696,00	\$ 81.696,00	\$ 81.696,00	\$ 81.696,00
Flujo de caja	\$ -236.000,00	\$ 52.201,00	\$ 52.201,00	\$ 52.201,00	\$ 52.201,00	\$ 52.201,00	\$ 52.201,00	\$ 52.201,00	\$ 52.201,00
Total	\$ -236.000,00	\$ -183.799,00	\$ -131.598,00	\$ -79.397,00	\$ -27.196,00	\$ 25.005,00	\$ 77.206,00	\$ 129.407,00	\$ 181.608,00

Figura 34: Flujo de caja del proyecto reformulado

Con estos arreglos se presenta una rentabilidad en la inversión, obteniendo un **VAR** de **42.500 [USD]** (con la misma tasa de descuento), un **TIR** del **15 [%]** y un **Payback** de **4,9 [años]**.

Análisis de Sensibilidad:

Del análisis de sensibilidad se observa que el proyecto presenta una alta dependencia al precio del combustible, al porcentaje de ahorro de combustible y al aumento en los costos del mantenimiento, mientras que el precio del equipo de electrólisis no tiene gran impacto en el TIR.

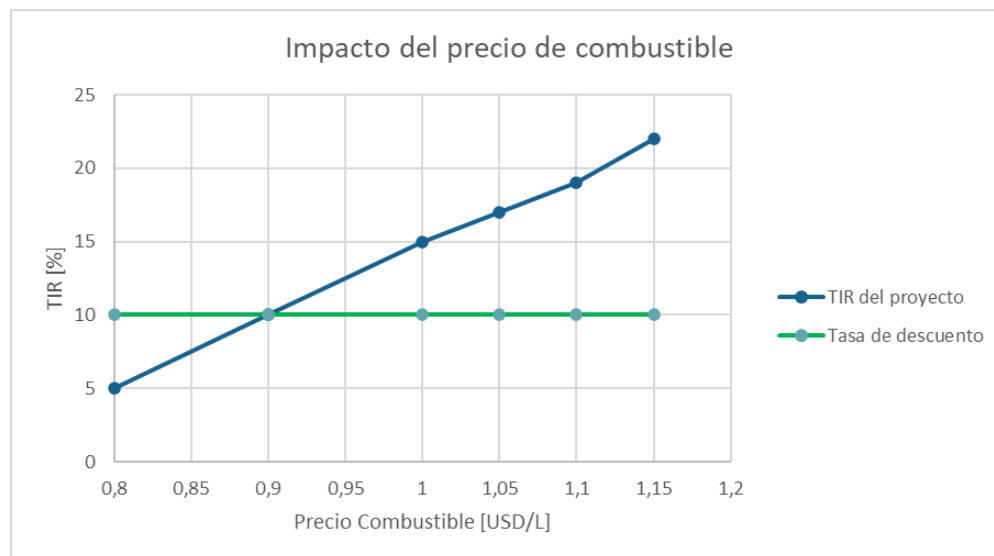


Figura 35: Sensibilidad del TIR al precio del combustible

A partir de la Figura 35 se observa que por cada 5 centavos de dólar que aumenta el precio del combustible, la TIR aumenta aproximadamente un 2 [%]. Esto si bien presenta un posible riesgo dado a que esto es un factor externo a la Empresa, al mismo tiempo esto refleja a esta tecnología como una forma de mitigar este riesgo a un nivel global. Se destaca que el proyecto pierde rentabilidad a un precio de combustible de 0,9 [USD/L].

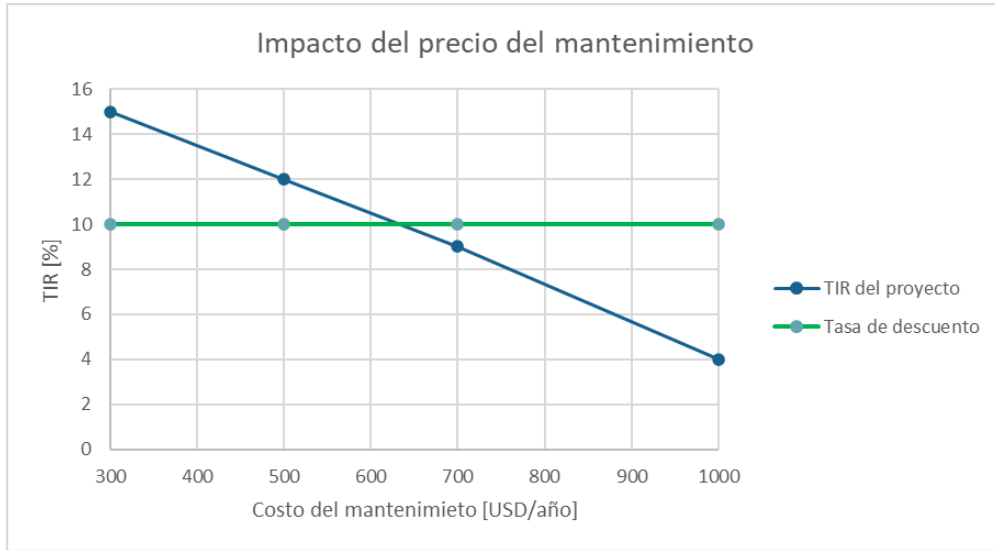


Figura 36: Sensibilidad del TIR al costo agregado de mantenimiento

A partir de la Figura 36 se observa que por cada 200 [USD] que se agregan al costo de mantenimiento por equipo de electrólisis, el TIR disminuye un 3 [%]. Para mitigar este riesgo se recomienda invertir más en la instalación del equipo, incorporando más elementos para el amortiguamiento. Se aprecia que con un aumento en el plan de mantenimiento de 650 [USD] por vehículo, el proyecto deja de ser rentable.

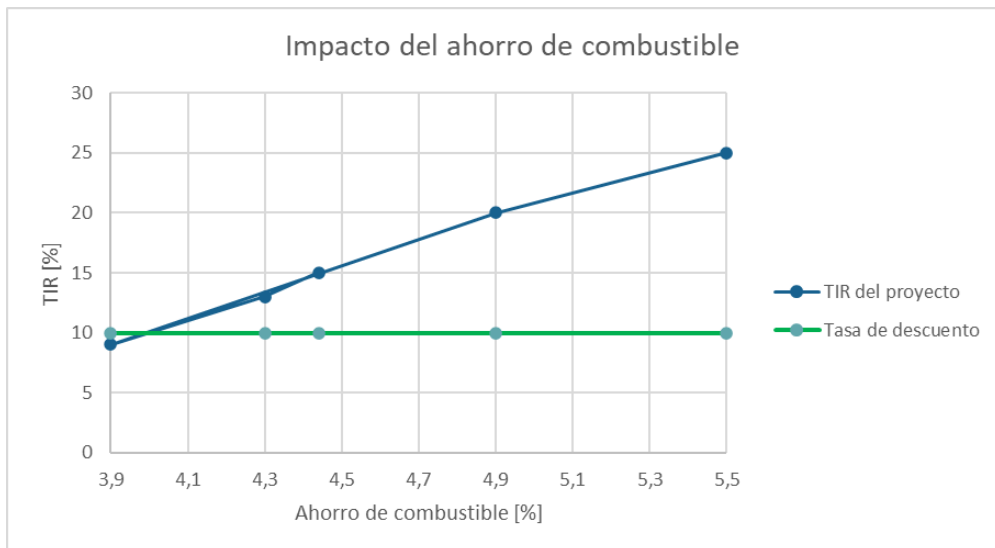


Figura 37: Sensibilidad del TIR al ahorro de combustible

A partir de la Figura 37 se observa que el proyecto se vuelve rentable a partir de un 4 [%] de ahorro de combustible (TIR igual a la Tasa de descuento), aumentando un 2 [%] la TIR por cada 0,15 [%] de aumento en el ahorro de combustible.

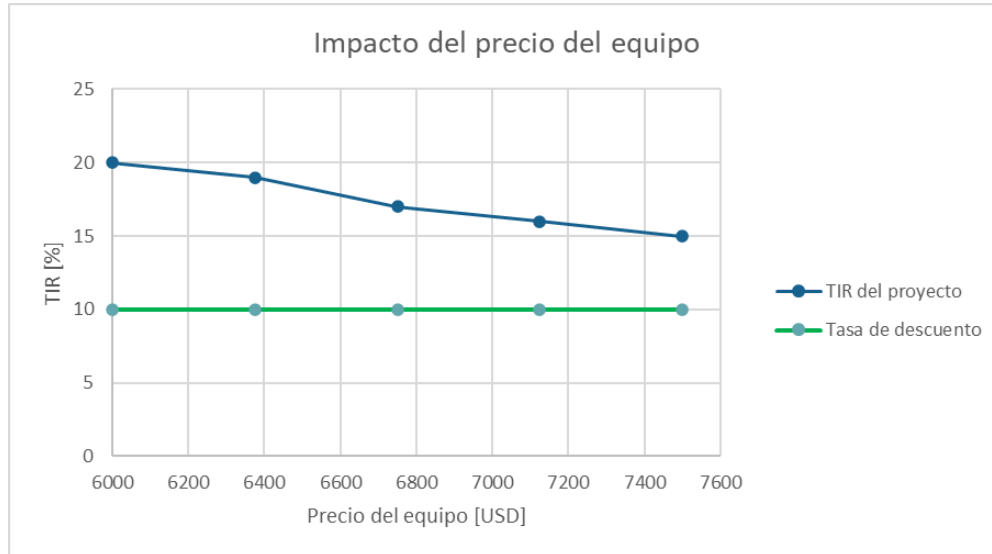


Figura 38: Sensibilidad del TIR al precio del equipo de electrólisis

En la Figura 38 se observa una curva más nivelada, lo que refleja una menor sensibilidad a la variación del precio comercial del equipo. A pesar de esto, se recomienda llegar a un acuerdo con la empresa proveedora por un descuento en el costo de la tecnología al realizar una compra a gran escala.

Costo Nivelado:

La última prueba para ver la factibilidad económica de esta implementación, es calcular el costo nivelado de la flota de vehículos en los 8 años de vida útil del equipo. Para esto se comparará el caso base, es decir el costo operativo del vehículo por kilómetro recorrido y el caso con HHO, donde se agregará al costo operativo el CAPEX y OPEX vinculadas al uso del equipo de electrólisis.

Caso base:

$$LCO_{original} = \frac{\$Operacional}{Kilometraje} = 0,45 \left[\frac{USD}{km} \right]$$

Caso HHO:

$$LCO_{HHO} = \frac{\$Operacional + CAPEX + OPEX - \$Ahorro}{kilometraje} = 0,40 \left[\frac{USD}{km} \right]$$

A nivel operacional, la implementación de la tecnología de electrólisis disminuye los costos de operación en un 12,5 [%].

6. Conclusiones

- Mediante los algoritmos KMEANS se lograron agrupar las operaciones de los vehículos intervenidos en 3 grandes clusters, siendo seleccionados a partir de los factores operacionales más influyentes de cada zona. De estos, los vehículos del sector de Chillán presentaron un **consumo de combustible** más estable, donde sus factores operacionales principales son el promedio de conducción [km/h] y el porcentaje de uso del programador de velocidad [%]. La estabilidad del consumo de combustible es producto de la homogeneidad de sus operaciones.

Para el vehículo “Chillán 1” se observó que a velocidades de 60 [km/h] y un uso del programador de velocidad del 28 [%], el consumo de combustible es de **40,45 [L/100km]**, siendo su consumo menor. En el otro extremo, a velocidades de 50 [km/h] y un porcentaje de uso del programador de velocidad del 35 [%], el vehículo tuvo un consumo de combustible de **42,17 [L/100km]**.

Para el vehículo “Chillán 2” se observó que para una velocidad de 53 [km/h] y un porcentaje de uso de programador de velocidad del 30 [%], se obtuvo un consumo de combustible de **42,56 [L/100km]**, el menor consumo en este vehículo. En el otro extremo, con velocidades de 48 [km/h] y un porcentaje del uso de programador de velocidad del 20 [%], el vehículo consume **47,17 [L/100km]** de combustible.

Los vehículos de la zona de Arauco presentan un **consumo de combustible promedio** más disperso, y los factores operacionales más influyentes son el promedio de conducción [km/h], el tiempo en ralentí [%] y el tiempo en punto muerto [%].

Para el vehículo “Arauco 1” se observó que a velocidades de 69 [km/h] y tiempos de ralentí y en punto muerto del 6 [%], se obtiene un consumo de combustible de **36,29 [L/100km]**. En el otro extremo, a velocidades de 47 [km/h], un porcentaje de tiempo en ralentí de 10,68 [%] y en punto muerto de 8,18 [%], el vehículo presenta un consumo de combustible de **48,42 [L/100km]**.

Para el vehículo “Arauco 2”, a velocidades de 56 [km/h], con un porcentaje de tiempo en ralentí y en punto muerto de 8 [%], el consumo de combustible es de **40,53 [L/100km]**. En el otro extremo, a velocidades de 42 [km/h], con un porcentaje de tiempo en ralentí del 8 [%] y del punto muerto de 13,72 [%], se presentó un consumo de combustible del **51,61 [L/100km]**.

- Gracias al algoritmo KMEANS se pudo asignar los datos de las fechas de operación con HHO en los clusters asignados, logrando realizar una comparación de consumo de combustible en las mismas condiciones operacionales.

Para el vehículo “Chillán 1”, los datos de HHO se asignaron a los modos de operación 2 y 3, obteniendo entre ambos un ahorro de combustible del **4,43** [%].

Para el vehículo “Chillán 2”, los datos de HHO se asignaron al 3° modo de operación, obteniendo un ahorro de combustible del **4,46** [%].

Los vehículos de la zona de Chillán presentaron un ahorro del consumo de combustible promedio del **4,44** [%], con un intervalo de confianza de 0,54 [%].

Para el vehículo “Arauco 1”, se asignaron los datos de HHO a los modos de operación 1 y 2, obteniendo entre ambos un ahorro de combustible del **2,72** [%].

Para el vehículo “Arauco 2”, se asignaron los datos de HHO al 2° modo de operación, obteniendo en este un ahorro de combustible del **10,40** [%].

Los vehículos de la zona de Arauco presentaron un ahorro del consumo de combustible promedio del **5,16** [%], con un intervalo de confianza de 5,84 [%]. Dado a que este valor es mayor a la mitad del ahorro promedio, se considera que este resultado es inválido.

- La evaluación de la factibilidad técnica de implementar esta tecnología en otros departamentos de la Empresa, en particular en los camiones tolva del Área de Caminos, indica que es posible, pero se debe invertir más en la instalación del equipo, agregando elementos de amortiguación para las vibraciones. Además se deben seleccionar los vehículos que operen bajo las mismas condiciones que los del sector de Chillán, debido a que los daños presentes en los equipos utilizados en la zona de Arauco.

La evaluación de la factibilidad económica proyecta que implementar esta tecnología de electrólisis en una flota de 50 camiones, siendo 25 del Departamento de Caminos y 25 del Departamento de Transporte **no** es rentable. Esto dado a que el consumo promedio de los camiones tolva de Caminos no produce un ahorro de combustible significativo. Proyectando un flujo de caja de 8 años, siendo la vida útil del equipo, entrega un VAN de **-97.000 [USD]** con una tasa de descuento del 10 [%]. Al reformular esta implementación para que sea únicamente en los vehículos del Departamento de Transporte ubicados en Chillán u otra comuna que realice operaciones similares a las de esta, se tiene un proyecto que presenta un VAN de **42.500 [USD]**, con la misma tasa de descuento, un **TIR** del **15** [%] y un **Payback** de **4,9** [años].

Esta implementación es altamente sensible al precio del combustible en el mercado, mejorando la rentabilidad a medida que este sube, al costo de mantenimiento asociado a instalar esta tecnología y al porcentaje de ahorro de combustible obtenido, lo que fortalece el hecho que se debe invertir más en la instalación y se debe operar exclusivamente en vehículos que circulen en carretera.

El costo nivelado de la flota al implementar esta tecnología mejora un **12,5** [%].

- Si bien los resultados de este trabajo son positivos, la forma en que se realizaron las pruebas dejaron un número considerable de factores influyentes en el consumo de combustible, destacando la ausencia de un registro de las condiciones ambientales y los circuitos realizados. Por lo demás, siguiendo las indicaciones de la norma **SAE J1321**, la cual entrega recomendaciones para realizar pruebas de consumo de combustible en terreno, al revisar los vehículos que circularon en las mismas fechas que los estudiados, un 40 [%] de estos presentó una disminución de su consumo de combustible en las fechas que se hicieron las pruebas. Esto sumado al echo de que no hay un registro de los recorridos realizados, **no** hay forma de confirmar si el ahorro medido en este trabajo es producto de utilizar HHO o es por algún factor no identificado.

Debido a esta falta de robustez en la metodología, los resultados obtenidos en esta prueba quedan **inconclusos**.

- Se recomienda a la Empresa mejorar su metodología experimental, basándose en la norma **SAE J1321**, con el fin de obtener unos resultados finales respecto a la tecnología de electrólisis. Para garantizar un procedimiento correcto en las pruebas nuevas, se debe definir un encargado del proyecto, quien además de medir el consumo de combustible de los vehículos estudiados, estará encargado de capacitar y guiar las operaciones de los equipos de HHO.

Además de que consideren implementar tecnologías que utilicen electrolizadores PEM, dado que al no utilizar electrolitos en su solución acuosa, disminuyen los riesgos de algún accidente operacional. Estas tecnologías ya se encuentran en el mercado, y se promocionan como una solución más robustas que los electrolizadores alcalinos clásicos. También se recomienda investigar metodologías para medir las diferencias en las emisiones de GEI producidas en las operaciones.

Referencias

- [1] Arauco, (2022). Estrategia de Sustentabilidad 2022. <https://arauco.com/chile/wp-content/uploads/sites/14/2024/01/ESTRATEGIA-DE-SUSTENTABILIDAD.pdf>
- [2] The Editors of Encyclopedia Britannica. (2025). Industrial Revolution. In Encyclopedia Britannica.
- [3] BBVA. (2025, March 17). Combustibles fósiles: qué son y cómo impulsan la energía global. BBVA. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-el-combustible-fosil-la-energia-que-se-obtiene-de-la-materia-organica/>
- [4] National Geographic. (2017, April 28). Así afecta al calentamiento global la quema de combustibles fósiles. National Geographic.
- [5] Inffibnet, Physico-Chemical Properties of Fuel – Energy and environment. Inffibnet.Ac.In. <https://ebooks.inffibnet.ac.in/esp07/chapter/physico-chemical-properties-of-fuel/>
- [6] U.S. E.I.A. Coal explained - U.S. Energy Information Administration (EIA). Eia.gov. From <https://www.eia.gov/energyexplained/coal/>
- [7] Ritchie, H., Rosado, P. (2022, October). Fossil fuels. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/fossil-fuels>
- [8] U.S. E.I.A. Crude oil distillation and the definition of refinery capacity - U.S. Energy Information Administration (EIA). (n.d.). Eia.gov. From <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=6970>
- [9] wikimedia commons, File:Crude oil distillation-fr.Svg - wikimedia commons. (n.d.). Wikimedia.org. From https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crude_Oil_Distillation-fr.svg
- [10] Turns, S. R. (2013). An Introduction to Combustion: Concepts and Applications
- [11] ALS Global. Library of petroleum products and other organic compounds [PDF]. <https://www.alsglobal.eu/media-general/pdf/library-of-petroleum-products-and-other-organic-compounds.pdf>
- [12] Y.Cengel M. Boles. Termodinámica. 7ma edición. McGraw-Hill.
- [13] Yergin, D. (2009). The Prize: The Epic Quest for Oil, Money, and Power. Free Press.
- [14] BBC News, Ucrania y Rusia. (2022, February 22). BBC. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-60478253>
- [15] Turns, S. R. (2013). An Introduction to Combustion: Concepts and Applications
- [16] Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). El Acuerdo de París. <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>
- [17] Heywood, J. B. (1988). Internal Combustion Engine Fundamentals.
- [18] Proctor, C. L., Van Horn Armstrong, L. (2024). diesel engine. In Encyclopedia Britannica.
- [19] Leach, F., Kalghatgi, G., Stone, R., Miles, P. (2020). The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines. Transportation Engineering (Amsterdam), 1(100005), 100005. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100005>
- [20] Nissa Global, e-POWER's internal combustion engine achieves 50% thermal efficiency. Global.com. From https://www.nissan.global.com/EN/INNOVATION/TECHNOLOGY/ARCHIVE/E_POWER50/
- [21] Wang, Z.; Shuai, S.; Li, Z.; Yu, W. A Review of Energy Loss Reduction Technologies for Internal Combustion Engines to Improve Brake Thermal Efficiency. Energies 2021, 14, 6656. <https://doi.org/10.3390/en14206656>
- [22] Abas, N., Kalair, A., Khan, N. (2015). Review of fossil fuels and future energy technologies. Futures, 69, 31–49. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2015.03.003>
- [23] Baltacioglu, M. K., Kenanoglu, R., Aydın, K. (2019). HHO enrichment of bio-diesohol

- fuel blends in a single cylinder diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(34), 18993–19004.
- [24] Trafigura. (2022). Descarbonización del transporte pesado por carretera: Estudio sobre las rutas hacia cero emisiones para el transporte de larga distancia. https://www.trafigura.com/media/51vp0rhd/2022_trafigura_decarbonising_heavy_duty_trucking_es.pdf
- [25] H2Chile, Seguridad del hidrógeno – H2Chile. H2chile.Cl.From <https://h2chile.cl/seguridad-del-hidrogeno/>
- [26] Roy, R., Antonini, G., Hayibo, K. S., Rahman, M. M., Khan, S., Tian, W., Boutilier, M. S. H., Zhang, W., Zheng, Y., Bassi, A., Pearce, J. M. (2025). Comparative techno-environmental analysis of grey, blue, green/yellow and pale-blue hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 116, 200–210. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.03.104>
- [27] Endress+Hauser. Producción de hidrógeno azul. <https://www.es.endress.com/es/sostenibilidad-soluciones/produccion-de-hidrogeno/produccion-de-hidrogeno-azul#toc10>
- [28] Smolinka, T., Bergmann, H., Garche, J., Kusnezoff, M. (2022). The history of water electrolysis from its beginnings to the present. In *Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications* (pp. 83–164). Elsevier.
- [29] Brayek, M., Jemni, M. A., Driss, Z., Kantchev, G., Abid, M. S. (2019). Study of spark-ignition engine fueled with hydrogen produced by the reaction between aluminum and water in presence of KOH. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(2), 695–705. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3192-4>
- [30] Al-Dawody, M. F., Al-Farhany, K. A., Allami, S., Idan Al-Chlaihawi, K. K., Jamshed, W., Eid, M. R., Raezah, A. A., Amjad, A., & El Din, S. M. (2023). Using oxy-hydrogen gas to enhance efficacy and reduce emissions of diesel engine. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(12), 102217.
- [31] Repsol. Así funciona un electrolizador, la clave para producir hidrógeno renovable.
- [32] ScienceDirect. Faraday's law of electrolysis. Elsevier
- [33] Harris Products Group. (s.f.). Oxihidrógeno: ¿qué es y para qué se utiliza?. <https://www.harrisproductsgroup.com/es-MX/Resources/Knowledge-Center/Articles/Oxy-Hydrogen>
- [34] Baltacioglu, M. K., Kenanoglu, R., Aydın, K. (2019). HHO enrichment of bio-diesohol fuel blends in a single cylinder diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(34), 18993–19004.
- [35] Babu, J. M., Kumar, K. S., Kumar, R. R., Ağbulut, Ü., Razak, A., Thakur, D., Sundara, V., Asif, M. (2024). Production of HHO gas in the water-electrolysis unit and the influences of its introduction to CI engine along with diesel-biodiesel blends at varying injection pressures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 52, 865–885. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.078>
- [36] Algayyim, S. J. M., Saleh, K., Wandel, A. P., Fattah, I. M. R., Yusaf, T., Alrazen, H. A. (2024). Influence of natural gas and hydrogen properties on internal combustion engine performance, combustion, and emissions: A review. *Fuel*, 362, 130844. From <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130844>
- [37] Elgarhi, I., El-Kassaby, M. M., Eldrainy, Y. A. (2020). Enhancing compression ignition engine performance using biodiesel/diesel blends and HHO gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(46), 25409–25425. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.273>
- [38] Sabeghi, M., Moghiman, M., Gandomzadeh, D. (2023). Experimental study of the effect of HHO gas injection on pollutants produced by a diesel engine at idle speed. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(24), 9117–9126. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.010>
- [39] Trujillo-Olivares, I., Wintergerst-Felipe, A., Gutiérrez-Paredes, G. J., González-Huerta, R. de G., Sandoval-Pineda, J. M. (2024). Dual combustion oxyhydrogen-diesel: Effects on internal components of engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 49, 178–192.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.059>

- [40] Wang, M.; Matsugi, A.; Kondo, Y.; Sakamoto, Y.; Kajii, Y. Impact of Hydrogen Mixture on Fuel Consumption and Exhaust Gas Emissions in a Truck with Direct-Injection Diesel Engine. *Energies* 2023, 16, 4466. <https://doi.org/10.3390/en16114466>
- [41] Guan, M., Rochussen, J., Steiche, P., Sapkota, N., Farzam, R., McTaggart-Cowan, G., Rogak, S. N., Kirchen, P. (2024). Characterizing hydrogen-diesel dual-fuel performance and emissions in a commercial heavy-duty diesel truck. *International Journal of Hydrogen Energy*, 86, 1085–1096. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.08.480>
- [42] Gong, J.; Shang, J.; Li, L.; Zhang, C.; He, J.; Ma, J. A Comparative Study on Fuel Consumption Prediction Methods of Heavy-Duty Diesel Trucks Considering 21 Influencing Factors. *Energies* 2021, 14, 8106.
- [43] Mills, Sarah Ann, "Design of experiment and analysis techniques for fuel consumption data using heavy-duty diesel vehicles and on-road testing"(2019). M.S. thesis, Graduate Theses and Dissertations, Iowa State University, 2019.
- [44] SAE International, SAE J1321: Joint TMC/SAE Fuel Consumption Test Procedure - Type II, Warrendale, PA, USA, 2012.
- [45] Volvo Trucks, Especificaciones del Volvo FMX. [Volvotrucks.es](https://www.volvotrucks.es/es-es/trucks/models/volvo-fmx/specifications.html). From <https://www.volvotrucks.es/es-es/trucks/models/volvo-fmx/specifications.html>
- [46] Beylunioglu, F. C. (2024, May 5). INTRODUCTION TO MACHINE LEARNING, Chapter 7: Unsupervised Learning.
- [47] Rodríguez, D. (2023, June 9). Método del codo (Elbow method) para seleccionar el número óptimo de clústeres en K-means. *Analytics Lane*.
- [48] Leiva-Illanes, R., Amador, G., Herrera, C. (2025). Comparison of fuel cell electric vehicles, battery electric vehicles, and internal combustion engine vehicles to contribute to the energy transition in Chile. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1500(1), 012072. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1500/1/012072>