

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
Departamento de Ingeniería Comercial

TRANSICIÓN GRADUAL HACIA COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN CHILE: ANÁLISIS DE OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS PARA UNA MOVILIDAD SOSTENIBLE

Sebastián Antonio Manqui Maureira
INGENIERIA COMERCIAL
Noviembre 2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo:

Transición gradual hacia combustibles alternativos en Chile: análisis de oportunidades y desafíos para una movilidad sostenible

Nombre del candidato(a):

Sebastián Antonio Manqui Maureira

Carrera / Grado:

Ingeniería Comercial / Ingeniero Comercial

Campus: Vitacura **Departamento:** Ingeniería Comercial

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, __Roberto Eduardo Muñoz Lagos___, 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 (marcar una opción)

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

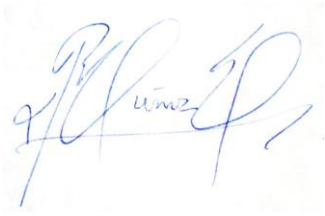
☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 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: 09-11-2026 **Firma:** _

Estudiante o Candidato(a): **Fecha:** 09-11-2026 **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.

TITULO DE MEMORIA:

“Transición gradual hacia combustibles alternativos en Chile: análisis de oportunidades y desafíos para una movilidad sostenible”

AUTOR:

SEBASTIÁN ANTONIO MANQUI MAUREIRA

TRABAJO DE MEMORIA, presentando en cumplimiento parcial de los requisitos para el Título de Ingeniero Comercial de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Observaciones:

_____

_____

Roberto Muñoz

Director de Memoria

Rodrigo Ortega

Correferente

Santiago, Noviembre 2026

Todo el contenido, análisis, conclusiones y opiniones vertidas en este estudio son de mi exclusiva responsabilidad.

Nombre: Sebastián Manqui

Firma: 

Fecha: 09-11-2026

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi familia y personas cercanas que me han acompañado durante este período, que sin lugar a duda ha sido uno de los retos más grandes de mi vida y ha cambiado en gran parte la forma en que veo las cosas, es ahora que entiendo a las personas que alguna vez me dijeron que disfrutara esta etapa, que a pesar de ser dura es una experiencia sumamente enriquecedora y en la que se conoce a gente que te acompañará por muchos años. Es ahora cuando pienso que quizás no lo aproveché del todo, pero ya no hay lugar para arrepentimientos, sobre todo por que ya estoy del todo inmerso en el siguiente gran paso de mi vida, que a pesar de aún no haber terminado esta etapa aún.

Creo que no hay caso en que reescriba nuevamente esto, ya que de cualquier forma no quedaré conforme, hay demasiadas personas que tengo en mente y mi capacidad muy limitada como para poder poner en palabras lo que cada uno se merece, con lo que solo me queda una cosa que decir, esta es mi forma de retribuir todo lo que me han dado y cada logro que pueda llegar a tener es para ustedes.

Gracias a todos.

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación evalúa la viabilidad estratégica de implementar un modelo híbrido de transición energética para el transporte en Chile, integrando la electromovilidad directa, el hidrógeno verde y los combustibles sintéticos bajo un enfoque de sostenibilidad integral. En este esquema, el hidrógeno verde cumple un rol habilitante como insumo estratégico para la producción de e-fuels y como vector energético complementario para sectores de difícil electrificación. El estudio surge de la identificación de una tensión crítica entre las metas nacionales de descarbonización y las restricciones estructurales del mercado local, evaluando las limitaciones de una estrategia basada exclusivamente en la sustitución tecnológica.

A través de un diseño metodológico mixto de alcance exploratorio, se diagnosticaron las brechas de infraestructura y mercado utilizando datos de ingeniería de detalle y reportes oficiales (CEN, CNE, ANAC). Asimismo, se aplicaron herramientas de economía de la energía, incluyendo la estimación comparada de costos nivelados (LCOE) y costos totales de propiedad (TCO), con el objetivo de determinar la competitividad relativa y el impacto distributivo de cada tecnología.

Los resultados evidencian restricciones relevantes en la capacidad de expansión de la infraestructura eléctrica, particularmente en redes de distribución urbanas de alta demanda. Se determinó que solventar esta brecha mediante tarifas generales podría generar un subsidio cruzado regresivo, donde usuarios de menores ingresos financien indirectamente las externalidades de red asociadas a los primeros adoptantes de mayores ingresos, generando potenciales efectos distributivos regresivos. Adicionalmente, el análisis financiero identificó que, para segmentos de bajo recorrido diario (transporte particular urbano), el ahorro operativo de la electromovilidad no logra amortizar la inversión inicial en horizontes razonables, configurando una "zona de transición pasiva" donde la alternativa económicamente más eficiente puede corresponder a prolongar la vida útil del vehículo existente antes que acelerar su recambio tecnológico.

Los combustibles sintéticos aparecen como una alternativa relevante para ampliar la cobertura territorial de la descarbonización y diversificar los riesgos asociados a la transición energética. Aunque presentan desafíos regulatorios asociados a la certificación de origen y mayores costos operativos, su capacidad drop-in permite descarbonizar zonas rurales, transporte de carga y flotas existentes sin requerir modificaciones sustanciales en la infraestructura de distribución actualmente existente.

Los resultados sugieren que un modelo híbrido de neutralidad activa podría representar una alternativa estratégicamente viable para la realidad chilena, donde la electromovilidad maximiza la rentabilidad social y privada en flotas de uso intensivo, mientras que el hidrógeno verde y los combustibles sintéticos contribuyen

a evitar la obsolescencia anticipada de activos y contribuir a la diversificación energética del sistema de transporte.

ABSTRACT

This research evaluates the strategic viability of implementing a mixed energy transition model for the transport sector in Chile, integrating direct electromobility, green hydrogen, and synthetic fuels under a comprehensive sustainability framework. The study emerges from the identification of a critical tension between national decarbonization goals and the structural constraints of the local market, questioning the efficiency of a single-technology substitution strategy.

Using a mixed-method exploratory design, infrastructure and market gaps were identified through engineering-level data and official reports from national institutions. Energy economics tools were applied, including comparative estimation of Levelized Cost of Energy (LCOE) and Total Cost of Ownership (TCO), in order to assess the relative competitiveness and distributive impacts of each technological pathway.

The results reveal limited elasticity in electrical infrastructure supply, particularly in high-demand urban distribution networks. Addressing this gap through general tariffs could generate a regressive cross-subsidy, where lower-income users indirectly finance grid externalities associated with early adopters. Additionally, the financial analysis identified that, for low daily mileage segments (private urban transport), operational savings from electromobility do not offset the initial investment within reasonable time horizons, creating a “passive transition zone” in which maintaining existing vehicles becomes economically optimal.

In contrast, synthetic fuels emerge as a relevant mechanism for territorial equity and systemic risk mitigation. Despite regulatory challenges and higher operational costs, their drop-in capability allows decarbonization of rural areas, freight transport, and existing fleets without requiring major infrastructure investments or placing additional stress on the electrical grid.

The study concludes that the optimal strategy for Chile is a hybrid model of active neutrality, where electromobility maximizes efficiency in high-utilization fleets, while green hydrogen and synthetic fuels help avoid premature asset obsolescence and strengthen energy security.

INDICE

páginas

1. **INTRODUCCIÓN** 9
2. **ORIGEN Y PROPÓSITO DEL ESTUDIO** 11
3. **OBJETIVOS** 13
4. **ALCANCE DEL ESTUDIO** 13
5. **ESTADO DEL ARTE** 14
6. **PROPUESTA METODOLÓGICA** 23
7. **APLICACIÓN METODOLÓGICA** 26
8. **RESULTADOS** 33
9. **CONCLUSIONES** 37
10. **RECOMENDACIONES** 41
11. **BIBLIOGRAFÍA** 45
12. **ANEXOS** 47
13. **ACRÓNIMOS** 51

1. INTRODUCCIÓN

La descarbonización del transporte se ha consolidado como uno de los principales desafíos de la agenda energética y ambiental contemporánea. En un contexto donde el cambio climático exige reducir drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero, la industria automotriz se encuentra en un proceso de transformación tecnológica acelerada, transitando desde el paradigma de los combustibles fósiles hacia nuevas fuentes de energía más limpias. Sin embargo, la materialización de esta transición no es homogénea; depende críticamente de las condiciones estructurales, económicas y geográficas de cada país.

Chile, con su meta de alcanzar la carbono-neutralidad al año 2050, se ha posicionado como un referente regional en la adopción de la electromovilidad. No obstante, la implementación de esta estrategia enfrenta restricciones estructurales relevantes que van más allá de la voluntad política. La realidad local impone restricciones operacionales y financieras relevantes, desde la saturación de las redes de distribución eléctrica en las ciudades hasta las barreras de financiamiento que dificultan el acceso a estas tecnologías para el usuario promedio y las pequeñas empresas.

En este escenario complejo, surge el interés por evaluar alternativas complementarias. Los combustibles sintéticos, producidos a partir de hidrógeno verde y captura de carbono, aparecen como una alternativa tecnológica complementaria compatible con la infraestructura actualmente existente y facilita una alternativa de implementación gradual a los sectores difíciles de electrificar.

La presente memoria de título aborda esta disyuntiva desde la perspectiva de la ingeniería comercial, buscando complementar la evaluación técnica incorporando dimensiones económicas, sociales y estratégicas. El estudio no se limita a preguntar "qué combinación tecnológica resulta más viable", sino que evalúa cuál es la combinación más viable para avanzar hacia una sostenibilidad integral del desarrollo país.

Para ello, el documento se estructura en diez capítulos que guían al lector desde el diagnóstico del problema hasta la propuesta de soluciones:

- En el capítulo 2, se delimita el origen y propósito del estudio, identificando las tensiones estratégicas que motivan la investigación.
- El capítulo 3 define los objetivos generales y específicos que orientan el análisis hacia la evaluación de la viabilidad sistémica.
- El capítulo 4 establece el alcance, definiendo los límites exploratorios y analíticos del trabajo.

- El capítulo 5 desarrolla el estado del arte, revisando los antecedentes bibliográficos, definiendo el sujeto de estudio como un sistema en tensión y estableciendo el marco teórico basado en la sostenibilidad integral y la economía de la energía.
- El capítulo 6 presenta la propuesta metodológica, detallando el diseño mixto y las herramientas de análisis (LCOE, TCO, Gap Analysis) utilizadas.
- El capítulo 7 corresponde a la aplicación metodológica, donde se procesa la evidencia empírica para diagnosticar las brechas de infraestructura y mercado.
- El capítulo 8 expone los resultados, discutiendo los hallazgos sobre la competitividad económica y las externalidades socioambientales de cada ruta tecnológica.
- Finalmente, los capítulos 9 y 10 presentan las conclusiones y recomendaciones, sintetizando el aprendizaje en lineamientos estratégicos para actores públicos y privados.

A través de este recorrido, se espera aportar una visión crítica y fundamentada que contribuya a la toma de decisiones en un proceso de transformación energética actualmente en desarrollo en Chile.

2. ORIGEN Y PROPÓSITO DEL ESTUDIO

2.1 Origen del estudio

La industria del transporte enfrenta una presión global creciente para descarbonizar sus operaciones. Si bien en las economías desarrolladas la electrificación directa se ha posicionado como el estándar tecnológico dominante (IEA, 2024), la extrapolación de este modelo a realidades latinoamericanas presenta restricciones estructurales que no han sido suficientemente ponderadas.

El origen de esta investigación radica en la identificación de una "doble tensión" en el caso chileno. Por un lado, existe una tensión técnica y económica: aunque la electrificación es eficiente en el uso de la energía, su despliegue masivo podría generar presiones sobre la capacidad de las redes de distribución locales, tal como advierte Braga (2020) para el caso de Santiago, exigiendo inversiones de capital que podrían ralentizar la transición. Frente a esto, la literatura plantea que los combustibles sintéticos podrían constituir una alternativa para mitigar parte de los riesgos de una transición acelerada, permitiendo descarbonizar el parque vehicular existente sin depender de un recambio inmediato de infraestructura (Mori et al., 2024).

Por otro lado, existe una tensión socioambiental crítica. Chile se ha posicionado como un actor clave en la cadena de suministro global para la electromovilidad, pero bajo un esquema que externaliza los costos ambientales en los territorios de extracción. La evidencia reciente sobre la huella hídrica de la minería de litio en el salar de Atacama (Vera et al., 2023) y la falta de normativas de responsabilidad extendida para la gestión de baterías al final de su vida útil (Zagorodny, 2023), sugieren que la reducción de emisiones globales podría generar nuevos impactos ambientales locales.

En este contexto, la falta de estudios en Chile que evalúen estas dos rutas tecnológicas (electromovilidad vs. e-fuels) bajo un enfoque integral de sostenibilidad —que incorpore no solo costos nivelados, sino también externalidades sociales y territoriales— constituye la limitada integración de evidencia que esta memoria busca abordar.

Es fundamental precisar que el compromiso de Chile con la carbono neutralidad al 100% para el año 2050 —consagrado en la Ley Marco de Cambio Climático— responde a criterios asociados a la vulnerabilidad climática del país y a su disponibilidad de recursos energéticos renovables. Un compromiso porcentual menor podría reducir parcialmente los incentivos para acelerar la sustitución de combustibles fósiles importados, perpetuando la exposición a la volatilidad de precios internacionales y limitando la reducción de externalidades ambientales asociadas al transporte. Al aspirar al 100%, el Estado chileno busca impulsar una

transformación estructural que posicione al país no solo como un adoptador de tecnología, sino como un actor relevante en el desarrollo y exportación de energías limpias, maximizando el valor de su matriz energética limpia.

2.2 Propósito del estudio

El propósito de esta investigación es examinar las condiciones técnicas, económicas y regulatorias que determinan la viabilidad de incorporar combustibles sintéticos como complemento a la electromovilidad en Chile. Dado el carácter incipiente de estas tecnologías en el mercado local, el estudio busca sistematizar la información dispersa para construir una visión integral de los escenarios de transición.

Específicamente, este trabajo pretende:

- Dimensionar las brechas: Pasar de la discusión teórica a la identificación concreta de las barreras (infraestructura, costos y normativa) que enfrentan hoy ambas tecnologías en el contexto chileno.
- Evaluar comparativamente: Utilizar herramientas de evaluación económica y social para contrastar la electromovilidad directa frente a los e-fuels en segmentos críticos, identificando bajo qué condiciones una alternativa presenta mayores ventajas relativas según el contexto de aplicación.
- Generar bases para la toma de decisiones: Proporcionar un marco de análisis estructurado y lineamientos preliminares que permitan a los actores públicos y privados reducir la incertidumbre en sus estrategias de inversión y políticas públicas.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL:

Evaluar la viabilidad estratégica de un modelo de transición energética mixto para el transporte en Chile, que integre la electromovilidad y los combustibles sintéticos, determinando las condiciones técnicas, económicas y socioambientales necesarias para contribuir a la sostenibilidad integral del sector automotriz nacional.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Diagnosticar las brechas estructurales del mercado chileno —tanto en capacidad de red eléctrica como en madurez de la cadena de valor de los e-fuels— que influyen en la velocidad de adopción de tecnologías de descarbonización.
- Determinar la competitividad económica relativa entre vehículos eléctricos y vehículos operados con combustibles sintéticos en segmentos críticos, mediante la estimación de costos nivelados (LCOE) y costos totales de propiedad (TCO).
- Analizar las externalidades socioambientales de ambas rutas tecnológicas bajo el enfoque Triple Bottom Line, contrastando la eficiencia operativa con los impactos en origen (huella hídrica/minería) y en destino (equidad territorial).
- Diseñar lineamientos estratégicos para actores públicos y privados que permitan articular una hoja de ruta de transición gradual, orientada a mitigar riesgos financieros y reducir la obsolescencia acelerada de activos.

4. ALCANCE DEL ESTUDIO

El presente trabajo se define bajo un alcance exploratorio con enfoque analítico, fundamentado en la clasificación de Hernández Sampieri (2018), dado que aborda un fenómeno —la coexistencia de electromovilidad y combustibles sintéticos en el mercado chileno— sobre el cual existe literatura aún en desarrollo que integre ambas variables simultáneamente.

Si bien el estudio no pretende comprobar hipótesis causales mediante modelos econométricos complejos, su alcance incorpora además una evaluación analítica de las principales variables económicas y estratégicas. Se busca estructurar la información dispersa para dimensionar económicamente los desafíos de la transición. En este sentido, la investigación se delimita a:

- Sistematización crítica de evidencia: No solo revisar experiencias internacionales, sino filtrar y contrastar su aplicabilidad técnica y

económica a la realidad chilena, priorizando modelos compatibles con las restricciones de la red eléctrica y la estructura de mercado chilena.

- Caracterización cuantitativa de brechas: Pasar de la identificación cualitativa de barreras a una estimación de órdenes de magnitud en costos (inversión inicial vs. operación) e infraestructura relevante para los escenarios de electrificación y uso de e-fuels.
- Evaluación de variables estratégicas: Delimitar y ponderar los factores clave —como el precio de la energía, la disponibilidad hídrica y el marco regulatorio integral— que actuarán como factores facilitadores o restrictivos para la inversión privada en el corto y mediano plazo.
- Propuesta de lineamientos tácticos: Generar un marco de recomendaciones preliminares que sirva de base para que futuros proyectos de inversión o políticas públicas puedan evaluar la viabilidad económica y efectos sociales de estas tecnologías con menor incertidumbre.

De esta forma, el estudio busca entregar valor como un marco de análisis exploratorio, proveyendo los criterios técnicos y económicos necesarios para apoyar procesos de toma de decisiones en una etapa temprana de la transición energética.

5. ESTADO DEL ARTE

5.1 ANTECEDENTES DEL ESTADO DEL ARTE

La literatura académica sobre la descarbonización del transporte ha evolucionado significativamente en la última década, transitando desde una visión puramente tecnológica —centrada en la eficiencia del motor— hacia un enfoque sistémico que integra variables económicas, infraestructurales y territoriales. Al contrastar el estado del arte internacional con la evidencia empírica disponible para Chile, se configuran tres ejes de discusión crítica que fundamentan la pertinencia de esta investigación.

1. La dicotomía tecnológica: Eficiencia termodinámica vs. Riesgo de transición

A nivel global, existe un consenso técnico en que el vehículo eléctrico a batería representa la ruta termodinámicamente más eficiente para el transporte ligero, debido a la menor pérdida de energía en la cadena "del pozo a la rueda". Sin embargo, la literatura reciente ha comenzado a cuestionar la viabilidad financiera y social de escenarios de electrificación predominante.

Investigaciones como las de Mori et al. (2024) introducen el concepto de "riesgo de activos varados", argumentando que una sustitución tecnológica acelerada podría dejar obsoleta una inmensa infraestructura de vehículos a combustión antes del fin de su vida útil económica. Bajo este prisma, los autores proponen que los

combustibles sintéticos no deben analizarse como competidores de la electrificación, sino como mecanismos de mitigación de riesgo, permitiendo descarbonizar el stock vehicular existente sin requerir un recambio inmediato de capital por parte de los usuarios. Esta visión es reforzada por Styring et al. (2021), quienes advierten sobre el riesgo de generar segmentos excluidos de la transición tecnológica, compuesta por aquellos segmentos de la población que, al no poder costear la alta inversión inicial de un vehículo eléctrico, quedarían excluidos de la movilidad si no se habilitan combustibles líquidos carbono-neutrales compatibles con sus vehículos actuales.

2. La brecha de implementación en Chile: Infraestructura de red y viabilidad económica

Al aterrizar la discusión global al contexto chileno, la literatura revela una desalineación entre las metas de política pública y la realidad de la infraestructura habilitante. Mientras la estrategia nacional de electromovilidad impulsa metas ambiciosas de ventas, los estudios de ingeniería de detalle sugieren restricciones relevantes en la red de distribución.

- Saturación de Infraestructura: El trabajo de Braga (2020) sobre la red de distribución de Santiago demuestra que la carga simultánea de flotas de buses eléctricos genera picos de demanda que superan la capacidad de los alimentadores actuales, exigiendo inversiones marginales en refuerzo de red que no siempre están internalizadas en la evaluación social de los proyectos. Esta limitación física es ratificada por Zapata (2022), quien advierte que, sin una gestión inteligente de la carga, la electrificación masiva podría comprometer la estabilidad del sistema eléctrico local.
- Desafío de rentabilidad (TCO): Desde la perspectiva de la demanda privada, Martínez Barahona (2024) evaluó la viabilidad financiera de electrificar flotas de alto recorrido (aplicaciones tipo Uber) en Santiago. Sus hallazgos indican que, a pesar de los menores costos operativos de la electricidad, la barrera del costo de inversión inicial sigue siendo prohibitiva sin subsidios agresivos, lo que retrasa el punto de equilibrio y desincentiva la adopción orgánica por parte de operadores privados sin espalda financiera.

3. El potencial productivo de los e-fuels y la restricción socio-territorial

Frente a las barreras de capital e infraestructura de la electrificación, Chile emerge en la literatura como un actor con ventajas comparativas relevantes para la ruta de los combustibles sintéticos.

El estudio global de Buchenberg et al. (2023) identifica a la Patagonia chilena y al desierto de Atacama como las zonas con los menores costos nivelados de producción (LCOE) de e-fuels en el mundo — entendiendo el LCOE como el costo promedio total de construir y operar la planta dividido por su producción total de energía proyectada —, gracias a factores de planta favorables en energía eólica y

solar que permiten reducir el costo del hidrógeno verde. Esta factibilidad técnica es confirmada a escala local por Cornejo (2024), quien modeló la cadena de valor en la zona central, aunque advirtiendo un desafío de competitividad comercial: el precio final del litro de combustible sintético sigue siendo superior al de su contraparte fósil, lo que sugiere que su competitividad dependerá de instrumentos regulatorios (como impuestos al carbono) más que de la paridad de precios natural en el corto plazo.

Finalmente, la literatura alerta que la elección tecnológica tiene implicancias de equidad territorial. Vergara-Perucich y Boano (2022) aportan evidencia crítica para el Gran Santiago, demostrando que la infraestructura de carga y la adopción de electromovilidad se concentran espacialmente en las comunas de mayores ingresos. Esto sugiere que una estrategia monotecnológica podría profundizar la segregación urbana, mientras que los e-fuels, al utilizar la red de distribución de combustibles existente, podrían ofrecer una vía de descarbonización más accesible territorialmente.

5.2 DESCRIPCIÓN DEL SUJETO DE ESTUDIO

El sujeto de estudio de esta investigación se define como la interacción sistémica entre dos rutas tecnológicas de descarbonización —la electromovilidad directa y los combustibles sintéticos— dentro del mercado automotriz chileno. Este objeto de análisis no se limita a la factibilidad técnica de los motores o combustibles per se, sino que se centra en la evaluación de su sostenibilidad integral, entendida bajo el enfoque del Triple Bottom Line: la interacción entre eficiencia económica, equidad social y responsabilidad ambiental.

Diferenciándose de la mera sustentabilidad ecológica, este estudio sitúa a la sostenibilidad como el criterio central de un desarrollo económico viable; bajo esta premisa, el sujeto de análisis se estructura en tres dimensiones críticas que definen la matriz de decisión estratégica nacional:

1. La dimensión económica-infraestructural: Restricciones de adopción

En esta arista, el estudio analiza la cadena de valor de la electromovilidad como un desafío de asignación de capital. El sujeto abarca las restricciones físicas del sistema de distribución eléctrica, caracterizadas por Braga (2020), quien demuestra que la electrificación no gestionada genera costos marginales crecientes en refuerzo de redes que afectan la eficiencia del sistema. Simultáneamente, se examinan las barreras de entrada financieras para la demanda privada: el alto costo de inversión inicial actúa como una limitación a la adopción masiva en flotas comerciales, tal como evidencia Martínez (2024). Aquí, el análisis se enfoca en determinar el "costo total de propiedad" real —entendido como la métrica que agrupa tanto la inversión de capital inicial como los gastos operativos futuros— y establecer su punto de equilibrio, que representa el período en el cual el menor

costo de operación de una tecnología limpia iguala a la inversión de una convencional. Esto permite evaluar cuándo la tecnología se vuelve financieramente sostenible sin una dependencia sostenida de subsidios estatales.

Bajo esta lógica, la viabilidad financiera de la electromovilidad depende directamente de variables operacionales como el kilometraje anual, la intensidad de uso del vehículo y el horizonte temporal de amortización de la inversión inicial. En términos económicos, la competitividad económica de los vehículos eléctricos se observa principalmente en escenarios de utilización intensiva —como flotas urbanas, taxis o buses— donde el ahorro operativo acumulado en combustible y mantención permite amortizar el mayor costo de adquisición en plazos razonables. Por el contrario, en segmentos de bajo recorrido o uso esporádico, la reducción de costos operacionales resulta insuficiente para justificar financieramente el reemplazo anticipado de activos.

2. La dimensión productiva y estratégica: Capacidades productivas y energéticas

Por el lado de la oferta, se estudia la naciente industria de los combustibles sintéticos como una alternativa potencial de desarrollo productivo y diversificación energética. Dentro de esta cadena de valor, el hidrógeno verde adquiere un rol relevante, no solo como insumo base para la síntesis de combustibles sintéticos, sino también como vector energético complementario en segmentos donde la electrificación directa presenta restricciones técnicas u operacionales. De este modo, la investigación no aborda únicamente una dicotomía entre electromovilidad y e-fuels, sino un esquema complementario de transición energética donde el hidrógeno verde actúa como insumo transversal: por un lado, funciona como la materia prima esencial (precursor químico) para la síntesis de los e-fuels; por otro, opera como un vector directo para la electromovilidad a través de celdas de combustible, solucionando las limitantes de peso y autonomía que presentan las baterías de litio tradicionales en el transporte de carga pesada. El sujeto incluye la evaluación de las ventajas comparativas de Chile —particularmente sus factores de planta excepcionales en energía solar y eólica— que, según Buchenberg et al. (2023), permiten proyectar costos nivelados de producción competitivos a escala global. No obstante, la disponibilidad de recursos renovables constituye solo una condición habilitante inicial, ya que la competitividad de los e-fuels depende también del desarrollo de infraestructura industrial complementaria, incluyendo electrólisis, captura de CO_2, capacidad portuaria, logística especializada y financiamiento de proyectos de gran escala. En consecuencia, el potencial competitivo de Chile no radica únicamente en la abundancia de recursos naturales, sino en su capacidad para articular una cadena de valor energético-industrial orientada a transformar dichos recursos en combustibles exportables competitivos.

Esta discusión también se observa en economías industrializadas como Alemania, donde el debate impulsado por sectores industriales llevó a revisar el enfoque inicial

de electrificación exclusiva dentro de la Unión Europea, permitiendo mantener espacio regulatorio para los combustibles sintéticos en vehículos de combustión posteriores a 2035. Este caso evidencia que incluso países con altos niveles de desarrollo tecnológico están adoptando enfoques híbridos de transición energética, buscando preservar capacidades productivas existentes y reducir los riesgos económicos asociados a una sustitución tecnológica acelerada.

La investigación analiza la capacidad de los e-fuels para actuar como un alternativa complementaria de transición: al ser bienes sustitutos perfectos, permiten aprovechar la infraestructura de distribución y el stock vehicular existente, mitigando el riesgo de obsolescencia anticipada de activos que implicaría una transición puramente eléctrica.

3. La Dimensión Socioambiental: Externalidades y Equidad

Finalmente, el sujeto de estudio incorpora explícitamente las externalidades que el mercado no internaliza en el precio, diferenciando la sostenibilidad real de la sostenibilidad declarativa.

Impacto en origen: Se analiza la huella hídrica en la cuenca del salar de Atacama derivada de la extracción de litio, documentada por Vera et al. (2023), cuestionando la sostenibilidad de una solución que desplaza el daño ambiental de las ciudades a las zonas con alta presión ambiental.

Impacto en destino: Se examina la distribución de los beneficios de la modernización. Siguiendo a Vergara-Perucich y Boano (2022), se estudia cómo la adopción tecnológica actual reproduce patrones de segregación socioespacial, concentrando la infraestructura de carga en zonas de altos ingresos.

En síntesis, el sujeto de estudio es la tensión entre estas tres dimensiones. El problema a investigar es cómo articular una hoja de ruta mixta que compatibilice bienestar social y viabilidad económica, evitando que la búsqueda de la descarbonización comprometa la viabilidad económica o la equidad territorial del desarrollo nacional.

Es imperativo reconocer que la persecución simultánea de objetivos económicos, sociales y ambientales no constituye un proceso de optimización lineal, sino que introduce un escenario de trade-offs estructurales. En la práctica de la ingeniería comercial, la existencia de objetivos múltiples implica que la maximización de una dimensión —por ejemplo, la reducción acelerada de emisiones mediante una electrificación acelerada— puede entrar en conflicto directo con la eficiencia en la asignación de recursos financieros o con la equidad distributiva de las tarifas. Por lo tanto, el reto estratégico de esta investigación no es alcanzar un óptimo teórico absoluto en cada eje, sino identificar una solución de compromiso (compromise solution). Esto implica buscar un equilibrio de Pareto donde los beneficios ambientales de la transición se obtengan sin imponer costos sociales regresivos ni

comprometer la viabilidad económica de largo plazo de los sectores productivos y los hogares.

5.3 MARCO TEÓRICO DEL ESTADO DEL ARTE

Para abordar la complejidad de la transición energética en el transporte chileno, esta investigación se fundamenta en un marco conceptual que integra la teoría económica, la gestión estratégica y la ecología industrial. Este enfoque multidisciplinario permite complementar la evaluación puramente técnica para analizar el problema como un desafío de optimización sistémica, donde se busca equilibrar eficiencia económica, sostenibilidad ambiental y viabilidad social.

El marco teórico se estructura en cuatro ejes analíticos que sustentan la evaluación de los escenarios de electromovilidad y combustibles sintéticos:

1. Sostenibilidad Integral y el Modelo "Triple Bottom Line"

Como eje rector, el estudio adopta el paradigma de la sostenibilidad integral, diferenciándose explícitamente del concepto tradicional de sustentabilidad, que frecuentemente se restringe a la conservación ecológica o biológica. Para operacionalizar este concepto, se utiliza el modelo del triple resultado o triple bottom line (Elkington, 1994).

Este modelo plantea que la viabilidad de largo plazo de una solución tecnológica depende del equilibrio entre tres funciones objetivo, minimizando los trade-offs entre dimensiones económicas, sociales y ambientales:

La dimensión económica: Se refiere a la capacidad del sistema para ser rentable y eficiente en la asignación de recursos. Una tecnología puede presentar menores emisiones directas, pero si depende de subsidios estatales perpetuos para sobrevivir, no es sostenible económicamente.

La dimensión social: Evalúa la equidad y el impacto en las personas. Implica analizar si los beneficios se concentran en segmentos de mayores ingresos y cómo se ven afectadas las comunidades donde se extraen los recursos (equidad territorial).

La dimensión ambiental: Busca la minimización de los daños ecológicos. Aquí se analiza el ciclo de vida completo, asegurando que la reducción de emisiones en la ciudad no genere impactos ambientales significativos en zonas de extracción en la zona de producción (por ejemplo, por uso excesivo de agua en minería).

2. Economía de la energía: Instrumentos de evaluación

Para objetivar la competencia entre tecnologías y evitar sesgos, se recurre a los instrumentos fundamentales de la economía de la energía que permiten comparar tecnologías con estructuras de costos y horizontes de inversión diferentes:

Costo nivelado de la energía (LCOE - Levelized Cost of Energy): Esta métrica representa el precio mínimo al que debe venderse la energía (o el combustible) para cubrir todos los costos de producción a lo largo de la vida útil del proyecto. El LCOE es fundamental para comparar la competitividad de los combustibles sintéticos frente a los combustibles fósiles, ya que permite aislar fluctuaciones de precios de corto plazo y entender si la tecnología es estructuralmente competitiva considerando su inversión inicial y costos de operación.

El Costo Total de Propiedad (Total Cost of Ownership, TCO) es una herramienta ampliamente utilizada para evaluar el costo económico total asociado a la adquisición y operación de un activo a lo largo de su vida útil. En el contexto del transporte, este enfoque permite comparar distintas tecnologías vehiculares considerando no solo el costo inicial de adquisición, sino también los costos operacionales futuros, tales como energía, mantención y otros gastos asociados.

$$TCO = C_{compra} + \sum_{t=1}^{n} \frac{C_{energia,t} + C_{mantencion,t} + C_{seguro,t}}{(1+r)^t}$$

Donde:

- C_{compra} corresponde al costo de adquisición del vehículo
- $C_{energia,t}$ representa el costo de energía en el período t
- $C_{mantencion,t}$ corresponde a los costos de mantención en el período t
- $C_{seguro,t}$ representa costos adicionales como seguros y otros gastos operacionales en el período t
- r corresponde a la tasa de descuento utilizada para actualizar los flujos futuros
- n corresponde al horizonte temporal de evaluación

En esta investigación, el TCO se utilizará para comparar económicamente vehículos eléctricos y vehículos de combustión interna que operan con combustibles sintéticos, considerando diferencias en costos de adquisición, consumo energético y costos operativos. Este enfoque permite capturar de manera más precisa las diferencias económicas de cada tecnología a lo largo del tiempo.

Para determinar el punto de equilibrio entre tecnologías, se comparará el valor presente del costo total acumulado de cada alternativa. En particular, se identificará el período en el cual el costo total de propiedad de ambas tecnologías se iguala, lo que puede expresarse como:

$$TCO_{EV}(t^*) = TCO_{ICE}(t^*)$$

Este punto de equilibrio representa el momento en que el menor costo operativo de una tecnología compensa su mayor inversión inicial. A partir de este análisis, es posible evaluar la conveniencia económica relativa de cada alternativa bajo distintos escenarios de uso, variaciones en los precios de energía y distintos niveles de kilometraje anual.

Adicionalmente, el análisis se complementará con escenarios de sensibilidad, considerando variaciones en el precio de la electricidad, el costo de los combustibles sintéticos y la intensidad de uso del vehículo, con el fin de evaluar la robustez de los resultados obtenidos.

Es fundamental precisar que la convergencia del TCO entre ambas tecnologías no es un fenómeno automático, sino que depende de una utilización intensiva del activo y del horizonte temporal proyectado. Alcanzar el punto de equilibrio es económicamente posible bajo las siguientes condiciones concurrentes:

1. **Alta intensidad de uso:** El ahorro operativo de la electricidad tiende a compensar el mayor costo de adquisición (CAPEX) en vehículos que recorren distancias anuales significativas (típicamente sobre los 30.000 km/año), como ocurre en flotas comerciales o de transporte público.
2. **Brecha de precios energética:** Se requiere una diferencia marcada entre el costo por kilómetro del combustible alternativo frente a la electricidad; una reducción en los subsidios eléctricos o un alza en el precio de la energía renovable alejaría el punto de paridad.
3. **Horizonte de planificación:** La paridad es factible siempre que el periodo de amortización no supere la vida útil técnica de la batería (generalmente 5 a 8 años). Sin estas condiciones, el TCO del vehículo eléctrico se mantiene por encima del convencional.

En términos cronológicos, las estimaciones de madurez de mercado sugieren que esta convergencia no ocurrirá de forma simultánea, sino escalonada según el segmento:

- **Corto Plazo (2025-2027) - Flotas Intensivas:** La paridad del TCO ya es una realidad o está en vías de consolidarse para flotas comerciales, taxis y transporte público urbano, impulsada por el alto ahorro en combustible.
- **Mediano Plazo (2028-2030) - Vehículo Particular:** Para el usuario particular de uso medio, se estima que el TCO alcance su punto de equilibrio hacia el final de esta década, condicionado a que los precios internacionales de las baterías desciendan sostenidamente (por debajo de los 100 USD/kWh) y esto se refleje en el mercado chileno.
- **Largo Plazo (Post-2035) - E-fuels:** Alcanzar una paridad de costos operativos netos para los combustibles sintéticos frente al diésel fósil —sin

depender estructuralmente de impuestos al carbono— se proyecta hacia la segunda mitad de la próxima década, dependiendo de la consolidación de economías de escala.

Internalización de externalidades: Se aplica la teoría de fallas de mercado para analizar costos no internalizados por el mercado que no se reflejan en el precio de mercado. Una externalidad negativa ocurre cuando la producción o consumo de un bien perjudica a un tercero sin compensación (ej. contaminación que causa enfermedades respiratorias). Este marco teórico postula que una evaluación correcta debe "internalizar" estos costos (asignarles un valor monetario) para determinar el verdadero beneficio social de cada tecnología.

3. Teoría de ventajas comparativas y cadenas de valor

Desde la perspectiva estratégica, se utiliza el marco de las ventajas comparativas (David Ricardo) y la visión basada en recursos (Jay Barney) para analizar por qué Chile podría ser un líder mundial en e-fuels.

La teoría postula que un país debe especializarse en producir aquello donde tiene un menor costo de oportunidad relativo. En el caso de Chile, la dotación natural única —la radiación solar más alta del mundo en el norte y los vientos constantes en la Patagonia— constituye una ventaja comparativa relevante. No obstante, es importante señalar que la dotación de recursos naturales (radiación y viento) constituye únicamente la ventaja comparativa o el insumo básico de la cadena. Siguiendo el modelo del Diamante de Porter, la transformación de esta dotación en una ventaja competitiva global requiere el desarrollo de factores avanzados que trascienden el recurso energético. La producción de e-fuels exige la integración de un ecosistema industrial complejo que incluye:

- **Infraestructura de conversión:** Plantas de electrólisis de alta eficiencia para la obtención de hidrógeno verde y unidades de captura de carbono (ya sea de fuentes biogénicas o captura directa de aire, DAC).
- **Procesamiento químico avanzado:** Reactores de síntesis (Fischer-Tropsch o Methanol-to-Gasoline) que requieren catalizadores especializados y gestión de procesos químicos de alta precisión.
- **Gestión de recursos críticos:** Sistemas de desalinización y tratamiento de agua, fundamentales para la electrólisis en zonas de estrés hídrico o regiones australes.
- **Logística y Capital Humano:** Desarrollo de puertos especializados, redes de transporte de fluidos y, crucialmente, la formación de capital humano técnico capaz de operar y mantener tecnologías de vanguardia.

Por lo tanto, el marco teórico analiza cómo Chile puede pasar de un modelo basado principalmente en exportación de recursos de “insumos energéticos” a convertirse

en un nodo de valor agregado tecnológico, mitigando la dependencia histórica mediante la creación de una cadena de valor industrial integrada y competitiva.

4. Transición sociotécnica y gobernanza

Finalmente, se incorpora la perspectiva de la transición sociotécnica (Geels, 2002), que entiende que el cambio tecnológico no es un proceso lineal donde la superioridad técnica por sí sola determina la adopción tecnológica, sino una reconfiguración compleja de mercados, regulaciones, infraestructuras y comportamientos de usuarios.

En este contexto, la Gobernanza se define como la capacidad de coordinación entre actores públicos y privados para alinear incentivos. Este concepto es crucial para analizar problemas de coordinación entre oferta y demanda de infraestructura: nadie compra autos eléctricos porque no hay cargadores y nadie instala cargadores porque no hay autos. La gobernanza es el mecanismo institucional para resolver estas fallas de coordinación y evitar la creación de "activos varados" (inversiones que quedan obsoletas antes de tiempo por falta de planificación).

6. PROPUESTA METODOLÓGICA

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque mixto (cualitativo y cuantitativo), con un alcance exploratorio. Esta elección metodológica responde a la naturaleza compleja del problema: la transición energética no puede analizarse únicamente desde criterios de costos, sino que es un fenómeno que involucra barreras regulatorias, comportamientos sociales y restricciones de infraestructura física.

Para cumplir con el objetivo de evaluar la viabilidad estratégica de una transición mixta, se ha diseñado un plan de trabajo estructurado en cinco etapas secuenciales. Este diseño busca complementar la revisión bibliográfica mediante herramientas analíticas para operacionalizar el concepto de sostenibilidad integral, utilizando herramientas propias de la ingeniería comercial y la economía de la energía.

A continuación, se detalla el flujo de trabajo, especificando los procedimientos, las fuentes de datos y los instrumentos analíticos de cada fase.

Etapa 1: Sistematización de la evidencia

Esta etapa constituye la base empírica de la investigación. Dado que existe mucha información dispersa y a menudo contradictoria, no se realizará una simple recopilación, sino un análisis documental sistemático orientado a filtrar información redundante o inconsistencias en la evidencia disponible priorizando la evidencia con mayor relevancia técnica y económica.

- Objetivo: Construir una línea base técnica y económica confiable para Chile.

- Procedimiento e instrumento: Se elaborará una matriz de categorización que clasificará la evidencia recolectada en tres ejes:

    1. Madurez tecnológica (TRL): Se evaluará el nivel de madurez tecnológica de cada alternativa para el mercado masivo.
    2. Estructura de costos: Se identificarán los costos de inversión y operación reportados en la literatura reciente.
    3. Impactos socioambientales: Se catalogarán las externalidades negativas documentadas (ej. uso de agua, emisiones indirectas).

- Fuentes de Información:

    - Literatura global: Se filtrarán bases de datos científicas (Web of Science, Scopus) buscando evidencia sobre la complementariedad de tecnologías. Se utilizarán como referencia teórica los trabajos de Mori et al. (2024), quienes analizan el potencial de los combustibles sintéticos para reducir riesgos asociados a la transición tecnológica y Styring et al. (2021), que abordan la equidad en el acceso al transporte.
    - Datos locales (normativa): Se procesarán los reportes oficiales de la comisión nacional de energía (CNE) y las metas establecidas en la estrategia nacional de electromovilidad y la estrategia nacional de hidrógeno verde, para entender el marco regulatorio vigente.

Etapa 2: Benchmarking de estrategias internacionales

El objetivo de esta fase es identificar experiencias internacionales relevantes y extraer aprendizajes aplicables al contexto chileno. Se realizará un Benchmarking comparativo, una herramienta de gestión que permite evaluar el desempeño de procesos o políticas frente a países con mayor desarrollo relativo en estas tecnologías.

- Selección de casos: Se analizarán experiencias de mercados avanzados (como Alemania para e-fuels y China para electrificación masiva) y mercados pares regionales.
- Variables de análisis: Se compararán específicamente los mecanismos de incentivo:

    - ¿Funcionaron mejor los subsidios directos a la compra o las exenciones de impuestos?
    - ¿Cómo resolvieron el problema de la falta de cargadores públicos?

- Normalización: Los datos internacionales serán "normalizados" o ajustados para hacerlos comparables con la realidad presupuestaria y geográfica de Chile, evitando extrapolar políticas incompatibles con la realidad chilena.

Etapa 3: Diagnóstico de brechas estructurales (gap analysis)

Esta es la fase de diagnóstico cuantitativo. Un gap analysis o análisis de brechas mide la brecha entre las metas proyectadas de carbono neutralidad y la capacidad estructural actual.

- Brecha de infraestructura: Se analizará la capacidad de la red eléctrica. Utilizando la metodología de Braga (2020) y los datos de operación del coordinador eléctrico nacional (CEN), se evaluará si los alimentadores (cables de distribución) actuales poseen capacidad operativa suficiente o capacidad suficiente para soportar la carga simultánea de miles de vehículos eléctricos, o si se requieren inversiones masivas en refuerzo de red.
- Brecha de mercado: Se caracterizará la flota vehicular nacional utilizando estadísticas del INE y la ANAC. Se segmentará el mercado por tipo de uso (transporte particular vs. comercial/carga) para identificar segmentos con mayores barreras de electrificación: sectores donde la electrificación es técnicamente inviable hoy (por peso o distancia) y donde los combustibles sintéticos tendrían una entrada inmediata.

Etapa 4: Evaluación de sostenibilidad

Esta etapa concentra la evaluación integrada de las variables analizadas. Aquí se integran todas las variables para determinar la viabilidad real de las tecnologías, aplicando el marco del Triple Resultado:

1. Dimensión económica (rentabilidad y competitividad):
    - Cálculo de LCOE: Se realizará una estimación comparativa del costo nivelado de energía (LCOE). Esta métrica indica cuánto cuesta producir una unidad de energía (un litro de e-fuel vs. un kWh de electricidad) a lo largo de toda la vida útil del proyecto. Para los e-fuels, se utilizarán los modelos de costos de producción local de Cornejo (2024).
    - Cálculo de TCO: Se adaptará el modelo de costo total de propiedad utilizado por Martínez (2024). Este indicador suma el precio de compra del vehículo más todos sus gastos de operación (energía, mantención, seguros) para determinar en qué año compensa la inversión inicial adicional del auto eléctrico (punto de equilibrio).
2. Dimensión social (equidad y acceso territorial):

- Se utilizará un enfoque de análisis cualitativo basado en evidencia georreferenciada. Siguiendo a Vergara-Perucich y Boano (2022), se proyectará cómo la distribución actual de la infraestructura de carga (concentrada en el sector oriente de Santiago) podría exacerbar la segregación urbana. Se evaluará si los e-fuels, al usar las gasolineras existentes en todo el país, ofrecen una alternativa con mayor cobertura territorial.

  Adicionalmente, se incorporará el análisis del efecto distributivo de los subsidios estatales. Desde la perspectiva de las finanzas públicas, los incentivos económicos para acelerar la adopción de la electromovilidad (tales como subsidios directos a la compra o exenciones de permisos de circulación) presentan un alto riesgo de regresividad. Dado que la barrera de capital inicial restringe la adquisición de estos vehículos casi exclusivamente a los quintiles de mayores ingresos, financiar dichos incentivos con fondos públicos podría generar efectos distributivos regresivos desde la base tributaria general hacia segmentos de mayores ingresos. Por lo tanto, la dimensión social evaluará el impacto de estas políticas para asegurar que el fomento a las tecnologías limpias no se traduzca en una profundización de las brechas distributivas existentes.

3. Dimensión ambiental (externalidades en origen):

   - Se ponderarán los impactos ambientales indirectos en la cadena de suministro. Se contrastará el consumo de agua fresca de la minería del litio en el desierto (Vera et al., 2023) frente a los requerimientos de desalinización para producir hidrógeno verde. El objetivo es identificar qué ruta tecnológica tiene una menor carga ambiental asociada, más allá de las emisiones del tubo de escape.

Etapa 5: Formulación de lineamientos estratégicos

Finalmente, los resultados de las etapas anteriores se integrarán en una matriz de decisiones estratégicas. Esta herramienta cruzará la factibilidad económica (Eje X) con las barreras estructurales y sociales (Eje Y) para jerarquizar las recomendaciones.

El producto final de esta etapa será una propuesta de hoja de ruta escalonada, que identificará:

- Medidas de corto plazo: Acciones inmediatas para facilitar el desarrollo de inversiones.
- Medidas de largo plazo: Reformas estructurales (ej. regulación de calidad para e-fuels o normas de responsabilidad extendida para baterías)

necesarias para mejorar la viabilidad de largo plazo de la transición en el tiempo.

7. APLICACIÓN METODOLÓGICA

En este capítulo se ejecuta el diseño metodológico definido previamente, pasando de la propuesta teórica a la evaluación empírica de los escenarios de transición. El objetivo central es operacionalizar las variables de sostenibilidad integral para evaluar la viabilidad real de implementar un modelo mixto de transporte en Chile.

El desarrollo se estructura siguiendo las cinco etapas del modelo de investigación, integrando la evidencia cuantitativa local con los marcos estratégicos globales.

7.1 Sistematización: Matriz de madurez y costos

Como primera fase del análisis, se procesó la evidencia técnica y económica disponible para establecer una "línea base" comparativa. Para evitar comparaciones metodológicamente inconsistentes entre tecnologías que están en etapas de desarrollo distintas, se utilizó el concepto de nivel de madurez tecnológica (o TRL, por sus siglas en inglés Technology Readiness Level). Esta métrica, estándar en la industria de la innovación, clasifica las tecnologías en una escala del 1 (principio básico observado) al 9 (sistema probado con éxito en entorno real).

A partir de la revisión de Mori et al. (2024) y Buchenberg et al. (2023), se construyó la siguiente caracterización detallada para el caso chileno:

A. Electromovilidad

Estado de madurez (TRL 9 - Despliegue Comercial): Esta tecnología ha superado todas las fases experimentales. En Chile, su madurez operativa es evidente en la red metropolitana de movilidad (RED), donde miles de buses eléctricos operan diariamente con altas tasas de disponibilidad. Esto sugiere un bajo nivel de incertidumbre tecnológica y una mayor experiencia operativa acumulada.

Limitación estructural principal: La limitante no reside en el vehículo, sino en su dependencia crítica de la red eléctrica. Como advierte Braga (2020), la infraestructura de distribución actual (cables, transformadores y subestaciones) no fue diseñada para cargas de alta potencia simultáneas. Esto genera costos sistémicos adicionales: para que el auto funcione, se requiere una actualización masiva de la red pública cuyos costos no se encuentran completamente internalizados en el precio del vehículo.

B. Combustibles Sintéticos

Estado de madurez (TRL 8/9 – Demostración industrial consolidada y escalamiento): A mayo de 2026, el proyecto Haru Oni de HIF Global en la región de Magallanes ha superado su fase inicial de prueba para consolidarse como un

proyecto de relevancia estratégica dentro del desarrollo de e-fuels en Chile. La planta mantiene una producción estable de e-fuels (aproximadamente 130,000 litros anuales), la cual se exporta a mercados europeos para su uso en alta competición y vehículos de lujo, bajo la alianza con Porsche.

Uno de los avances tecnológicos más relevantes en la actualidad es la plena capacidad operativa de su unidad de Captura Directa de Aire (DAC), instalada en 2025. Esta tecnología permite extraer el CO2 directamente de la atmósfera magallánica, cerrando el ciclo de carbono y contribuyendo a la trazabilidad del balance de carbono del producto. Financieramente, la viabilidad del modelo fue respaldada por una inyección de capital de USD 220 millones en 2024 (incluyendo a BID Invest), lo que ha permitido iniciar en 2026 la fase de escalamiento hacia la planta Cabo Negro, diseñada para producir 66 millones de litros anuales. Este avance sitúa a los e-fuels en Chile como una tecnología con capacidad operativa demostrada, con potencial aplicación en operaciones de alta exigencia como el abastecimiento de expediciones científicas antárticas sin los riesgos de congelamiento de los combustibles fósiles tradicionales.

Esto configura una falla de mercado clásica por asimetría de información: sin un sistema robusto y transfronterizo de Garantías de Origen, el consumidor no puede distinguir el "valor verde" del producto, generándose un problema de selección adversa donde el mercado termina favoreciendo alternativas de menor costo, pero con mayor intensidad de emisiones. En consecuencia, esta asimetría de información impide corregir la falla estructural del sector: la no internalización de las externalidades negativas. Al no existir un premio en el precio por la mitigación ambiental, la sociedad continúa asumiendo las externalidades (salud pública y cambio climático) que las alternativas fósiles no incluyen en su estructura de costos.

No obstante, más allá de las barreras regulatorias y de información, la viabilidad de los combustibles sintéticos enfrenta desafíos estructurales adicionales asociados a su competitividad en el largo plazo. En particular, la evolución de sus costos de producción se encuentra sujeta a una alta incertidumbre, debido a su dependencia del precio de la electricidad renovable, el desarrollo tecnológico de los procesos de electrólisis y la escala de producción alcanzada.

Adicionalmente, el desarrollo de esta industria en Chile presenta una fuerte orientación hacia mercados de exportación, lo que introduce un riesgo estratégico asociado a la demanda internacional y a la competencia con otros países que buscan posicionarse en este mercado. Esta dinámica puede afectar tanto la disponibilidad como el precio interno de los e-fuels, limitando su adopción a nivel local.

Por otra parte, su menor eficiencia energética en comparación con la electrificación directa implica que su uso resulta más adecuado en contextos específicos donde otras tecnologías enfrentan restricciones. En este sentido, los e-fuels deben

entenderse como una solución complementaria dentro de una matriz tecnológica diversificada, más que como un sustituto universal.

7.2 Benchmarking de estrategias: Lecciones internacionales

Para determinar qué políticas públicas son replicables en Chile, se aplicó una herramienta de Benchmarking comparativo utilizando los reportes de mercado de la IEA (2024) y la evidencia de políticas de transición analizada por Breuer et al. (2022). Se identificaron dos modelos regulatorios opuestos que ofrecen lecciones distintas:

1. El Modelo de incentivos intensivos a la demanda (caso Noruega)

Noruega es el líder mundial en adopción, con más del 80% de ventas de autos nuevos siendo eléctricos. Este resultado se explica principalmente por una política de amplias exenciones tributarias documentada por la IEA (2024): el Estado eliminó el IVA (25%), los impuestos de importación y los peajes para estos vehículos.

Análisis de aplicabilidad para Chile: Este modelo presenta una baja viabilidad fiscal para nuestra realidad. Chile es un país en desarrollo con restricciones presupuestarias y múltiples prioridades de gasto público (salud, educación y pensiones). Renunciar a la recaudación tributaria de la venta de automóviles generaría un costo fiscal significativo que el Estado difícilmente podría sostener en el largo plazo. Adicionalmente, los subsidios directos a la compra de vehículos eléctricos pueden generar efectos distributivos regresivos cuando benefician principalmente a hogares de altos ingresos, que son quienes poseen mayor capacidad de acceder a tecnologías de alto costo. En este contexto, políticas de incentivo mal focalizadas podrían generar efectos distributivos regresivos en lugar de democratizar la transición energética. Por lo tanto, una estrategia basada exclusivamente en subsidios masivos al consumo presenta riesgos tanto fiscales como distributivos para la realidad chilena.

2. El Modelo de "neutralidad tecnológica" y resiliencia industrial (Casos: Alemania, Japón, EE.UU. y Reino Unido)

En contraste con los subsidios masivos al consumo, diversas potencias automotrices han ajustado sus marcos regulatorios para evitar la dependencia de una tecnología única, priorizando la protección de sus cadenas de valor y la seguridad energética.

- Alemania y la Unión Europea: Alemania ha impulsado una flexibilización estratégica dentro de la política climática continental. Ante la propuesta original de la UE de prohibir la venta de motores de combustión interna para 2035, el gobierno alemán bloqueó la medida hasta obtener una exención permanente para vehículos que operen exclusivamente con combustibles sintéticos (e-fuels) neutros en carbono. Adicionalmente, a finales de 2023, Alemania eliminó abruptamente sus subsidios a la compra de vehículos

eléctricos debido a restricciones presupuestarias, lo que generó una contracción inmediata en las ventas y validó la tesis de que la adopción forzada por subsidios es fiscalmente frágil.

- Japón: El enfoque japonés, liderado por el Estado y consorcios como Toyota, se define como "Estrategia Multi-vía". Japón adopta un enfoque de diversificación tecnológica y promueve una matriz que integra vehículos híbridos avanzados, de hidrógeno y el desarrollo de e-fuels. Esta decisión es eminentemente comercial: busca proteger el denso tejido de pymes proveedoras de autopartes que no podrían sobrevivir a una transición eléctrica total y abrupta.
- Estados Unidos: A través del Inflation Reduction Act (IRA), EE.UU. ha desplazado el foco desde el subsidio al comprador hacia el incentivo a la producción. El país otorga créditos fiscales masivos para la producción de hidrógeno verde y Combustibles de Aviación Sostenibles (SAF), fomentando que la industria de combustibles líquidos evolucione en lugar de ser reemplazada completamente.
- Reino Unido (Inglaterra): El gobierno británico ha flexibilizado recientemente sus plazos de prohibición de motores convencionales, postergando la meta de 2030 a 2035 para alinearse con la capacidad real de renovación de su infraestructura de carga. Paralelamente, ha inyectado fondos públicos en la investigación de e-fuels para sectores estratégicos de difícil electrificación, como la maquinaria agrícola y el transporte pesado.

Análisis de aplicabilidad para Chile: Estos casos internacionales confirman que la transición energética no es un proceso lineal de sustitución tecnológica, sino un desafío de gestión de riesgos económicos. Para Chile, adoptar una política de neutralidad tecnológica —similar a la de Alemania o Japón— permitiría aprovechar sus ventajas competitivas en energías renovables para producir y consumir e-fuels, evitando la destrucción de valor de su infraestructura actual y garantizando una transición socialmente equitativa para sectores que no poseen la "espalda financiera" para una electrificación inmediata.

7.3 Diagnóstico de brechas estructurales

Utilizando datos cuantitativos de ingeniería local, se dimensionaron las brechas —la distancia técnica y económica entre la meta deseada y la realidad actual— en dos frentes críticos: la oferta de energía y la demanda de los usuarios.

7.3.1 Brecha de infraestructura (lado de la oferta)

El análisis de la tesis de Braga (2020) sobre la red de distribución de Santiago evidencia restricciones relevantes sobre la capacidad física del sistema. Su modelación demuestra que la carga simultánea de flotas eléctricas en horarios

punta genera demandas de potencia que superan la capacidad nominal de los transformadores de distribución existentes.

Implicancia económica y riesgo de regresividad: Un aspecto relevante del análisis corresponde al financiamiento esta actualización de la red. Si el costo de las inversiones marginales en distribución se traspasa directamente a la tarifa eléctrica de clientes regulados, se generaría una externalidad económica regresiva. Esto ocurre porque el aumento tarifario impactaría proporcionalmente más a los hogares de menores ingresos —quienes destinan un mayor porcentaje de su presupuesto mensual a energía— para financiar una infraestructura de carga que, en una primera etapa de adopción, sería utilizada casi exclusivamente por el quintil de mayores ingresos propietarios de vehículos eléctricos. Así, el modelo actual corre el riesgo de transferir parte de los costos de infraestructura hacia usuarios que no participan directamente de la adopción tecnológica con el presupuesto de los usuarios vulnerables.

En términos distributivos, esto equivale a un subsidio cruzado regresivo, donde los hogares de menores ingresos (con menor elasticidad precio-demanda) termina financiando las externalidades de red generadas por el consumo del decil más rico, exacerbando la desigualdad económica en el contexto de políticas de transición energética.

7.3.2 Brecha de rentabilidad privada (lado de la demanda)

Al examinar el modelo financiero de Martínez (2024) para flotas de alto recorrido (como aplicaciones tipo Uber), se detecta un problema crítico de flujo de caja.

Barreras asociadas al alto costo de adquisición inicial: Aunque el vehículo eléctrico presenta menores costos operacionales (la electricidad es más económica que la bencina y el motor requiere menos mantención), su costo de adquisición inicial continúa siendo elevado.

El problema del retorno (ROI): El análisis muestra que, sin subsidios, el tiempo necesario para recuperar esa inversión extra mediante el ahorro de combustible es demasiado largo para un inversionista privado pequeño o mediano. Esto crea una barrera de entrada financiera: aunque la tecnología sea conveniente a largo plazo, el usuario promedio no dispone de capacidad de financiamiento suficiente o acceso a crédito barato para pagar el costo inicial.

7.4 Evaluación de sostenibilidad:

Análisis integrado de sostenibilidad: En esta etapa, se integra la evidencia para aplicar el modelo de decisión del triple resultado. Cabe precisar que este enfoque no persigue una optimización matemática simultánea de las tres variables —objetivo inviable dado los trade-offs inherentes entre costo y sostenibilidad—, sino encontrar un equilibrio de compromiso (Pareto-eficiente). El objetivo es identificar escenarios donde la mejora en la dimensión ambiental no implique un costo social inaceptable

o una inviabilidad financiera que condene el proyecto al fracaso sin subsidios perpetuos.

1. Dimensión económica

El cruce de datos entre los estudios de producción de Cornejo (2024) y de operación de Martínez (2024) revela una dicotomía de costos fundamental que define la estrategia comercial:

Costo nivelado de energía (LCOE - La visión del Productor): La evidencia revisada sugiere que Chile podría desarrollar ventajas comparativas para la producción de e-fuels. Producir e-fuels en nuestro territorio podría alcanzar costos de producción relativamente más competitivos que en casi cualquier otro lugar gracias a la radiación solar del desierto y el viento patagónico. Sin embargo, debido a la ineficiencia termodinámica de convertir electricidad en líquido, el costo por litro seguirá siendo, en el corto plazo, superior al de extraer petróleo del suelo.

Costo total de propiedad (TCO - La visión del Usuario): Aquí es donde los e-fuels presentan ventajas relativas. Para el usuario final, la electrificación es una apuesta de capital intensivo (gastar mucho hoy para ahorrar mañana). En contraste, los e-fuels permiten: mantener el vehículo barato de hoy (motor a combustión), aunque el costo por kilómetro sea mayor. Económicamente, los e-fuels podrían reducir la necesidad de reemplazo inmediato de activos: evitan que el usuario (una familia o una PYME de transporte) tenga que endeudarse por 30 o 40 millones de pesos para renovar su activo, permitiéndole descarbonizar su operación con su capital actual.

2. Dimensión ambiental

Contrario a la visión simplista de "cero emisiones" en el tubo de escape, el análisis de ciclo de vida de Vera et al. (2023) introduce una restricción ética y física severa: el agua.

Restricciones hídricas asociadas a la extracción de litio: Una estrategia 100% eléctrica requiere millones de baterías nuevas. La extracción de litio necesaria para fabricarlas podría incrementar significativamente la presión sobre los recursos hídricos del Salar de Atacama, una zona que ya enfrenta estrés hídrico extremo. Básicamente, se corre el riesgo de reducir emisiones globales a costa de agravar el problema local de la sequía.

La Resiliencia de los e-fuels: En contraste, la producción de e-fuels en la zona austral (Magallanes), analizada por Ortega (2023), puede utilizar agua de mar desalinizada impulsada por la abundante energía eólica. Esto permite desacoplar la transición energética de la crisis hídrica continental, presentando potenciales ventajas ambientales en términos de uso hídrico y resiliente en su origen.

3. Dimensión social

El análisis espacial derivado de la investigación de Vergara-Perucich y Boano (2022) evidencia una distribución territorial desigual para la política pública: la "electromovilidad de mercado" podría reproducir patrones existentes de desigualdad urbana.

Distribución territorial desigual de la infraestructura de carga: La evidencia muestra que la infraestructura de carga pública y privada se concentra casi exclusivamente en las comunas de altos ingresos. Un usuario de una comuna periférica o de una zona rural no tiene acceso garantizado a la carga, limitando el acceso a infraestructura de carga disponible.

Valor social de los e-fuels: Al ser líquidos y transportables, estos combustibles pueden distribuirse instantáneamente a través de la red capilar de gasolineras que ya existe en cada pueblo, caleta y ciudad de Chile. Esto podría ofrecer ventajas relativas en términos de cobertura territorial, permite que las regiones extremas y las zonas rurales accedan a la descarbonización hoy mismo, sin tener que esperar décadas a que el Estado o los privados inviertan en llevar redes eléctricas de alta potencia a sus localidades aisladas.

Si bien el análisis muestra ventajas relevantes de los combustibles sintéticos en cada dimensión evaluada, es importante destacar que la transición energética implica necesariamente la existencia de trade-offs entre variables económicas, sociales y ambientales. Por ejemplo, mientras los e-fuels permiten reducir barreras de inversión inicial y mejorar la equidad territorial, presentan desafíos asociados a su menor eficiencia energética global en comparación con la electrificación directa. De manera similar, la electrificación, pese a sus desafíos en infraestructura y acceso, ofrece ventajas ambientales en términos de eficiencia energética y reducción directa de emisiones locales.

En este sentido, la evaluación bajo el enfoque de múltiples dimensiones no implica una optimización simultánea de resultados, sino la identificación de equilibrios estratégicos entre tecnologías. La coexistencia de soluciones aparece, así como una alternativa más eficiente que la adopción exclusiva de una sola tecnología, permitiendo aprovechar las fortalezas relativas de cada enfoque según el contexto de uso, la disponibilidad de infraestructura y las condiciones socioeconómicas del usuario.

8. RESULTADOS

A partir de la aplicación metodológica y el cruce sistemático de la evidencia empírica nacional e internacional, se presentan los hallazgos de la investigación. Estos resultados no corresponden únicamente a una descripción de tecnologías, sino una evaluación de la viabilidad sistémica de la transición energética en Chile, estructurada bajo las dimensiones de sostenibilidad definidas en el marco teórico.

8.1 Resultados del diagnóstico de brechas

El análisis de brechas revela que la principal limitación para la descarbonización en Chile no es la disponibilidad de vehículos, sino la capacidad de carga del sistema eléctrico de distribución, particularmente en sectores urbanos de alta densidad donde la infraestructura fue diseñada para patrones de consumo tradicionales y no para una electrificación masiva del transporte.

8.1.1 Costos asociados a la saturación de la red

Al procesar los datos de modelación de redes de distribución de Braga (2020), se identifica un resultado relevante: la electrificación no gestionada de flotas de transporte público y comercial genera una demanda de potencia en horas punta que puede exceder la capacidad nominal de los transformadores en sectores de alta densidad. Este fenómeno se intensifica especialmente en zonas urbanas con alta penetración de carga simultánea, donde la incorporación masiva de vehículos eléctricos puede generar sobrecargas locales y requerir la modernización de subestaciones, líneas de distribución y transformadores, incrementando los costos de inversión del sistema eléctrico.

- Resultado del análisis: Existe una inelasticidad de la oferta eléctrica a corto plazo. Para viabilizar la meta de electrificación al 2035, se requiere una inversión marginal en infraestructura de distribución significativamente mayor a la proyectada inicialmente. Si este costo se traspasa a tarifas, la ventaja operativa del vehículo eléctrico disminuye; si no se realiza la inversión, el riesgo de falla del sistema aumenta, generando potenciales riesgos para la seguridad energética.

8.1.2 La barrera de capital en la demanda privada

El análisis financiero basado en los modelos de Martínez (2024) demuestra que la adopción de electromovilidad en segmentos de uso intensivo (como taxis y aplicaciones) enfrenta una barrera financiera relevante para la adopción.

- Hallazgo estratégico: Aunque el vehículo eléctrico es operacionalmente más eficiente (menor costo por km), la inversión inicial requerida es significativa y el periodo de recuperación de la inversión supera el horizonte de planificación financiera de un operador promedio o PYME (3-5 años). Esto ocurre a menos que existan subsidios agresivos o modelos de financiamiento especializados que hoy son escasos en Chile.

8.2 Resultados de la evaluación económica comparada

La evaluación comparativa entre la ruta eléctrica y la ruta de los combustibles sintéticos arroja un resultado de complementariedad económica más que de sustitución directa.

8.2.1 Dicotomía de costos

Al contrastar los costos de producción (Cornejo, 2024) con los costos de propiedad (Martínez, 2024), se configura un escenario de compensación entre la inversión inicial y el costo operativo.

En primer lugar, respecto a la inversión inicial, la electromovilidad presenta una barrera de entrada alta debido al costo de la batería, que eleva significativamente el precio del activo. Por el contrario, los e-fuels requieren una inversión de capital prácticamente nula por parte del usuario, ya que permiten seguir utilizando los vehículos convencionales existentes. Esto sugiere que los combustibles sintéticos podrían representar una alternativa económicamente viable para usuarios con restricciones de liquidez o acceso limitado al crédito, como las pequeñas empresas de transporte.

En segundo lugar, al analizar el costo operativo, la relación se invierte. La electromovilidad ofrece un costo marginal por kilómetro muy bajo gracias a la eficiencia del motor eléctrico y el menor precio de la electricidad. En contraste, el litro de e-fuel es estructuralmente más caro de producir debido a las ineficiencias termodinámicas de su proceso de síntesis. Esto implica que la electromovilidad presenta ventajas financieras para usuarios de alto recorrido anual (como taxis o buses), quienes pueden amortizar la alta inversión inicial mediante el ahorro operativo acumulado.

Finalmente, en términos de costo nivelado de energía (LCOE), aunque Chile posee una ventaja competitiva global para producir e-fuels a precios decrecientes gracias a su factor de planta solar y eólico, el análisis indica que la paridad de precio con los combustibles fósiles no se proyecta en el corto plazo bajo las condiciones actuales de mercado. Para abordar estas diferencias de competitividad, podrían implementarse instrumentos de tarificación del carbono alineados con las recomendaciones de la OECD (2023), permitiendo incorporar al precio final los costos ambientales actualmente no internalizados por los combustibles fósiles. Este tipo de instrumentos busca incorporar los costos ambientales asociados a las emisiones en el precio final de los combustibles de la alternativa fósil, esta medida busca la internalización de externalidades negativas, asegurando que el precio de mercado refleje el costo social real de las emisiones. De este modo, la regulación no actúa como un castigo al consumidor, sino como un mecanismo de transparencia económica que, reduciendo distorsiones competitivas entre tecnologías para las tecnologías limpias, permitiendo que la ventaja productiva de Chile se traduzca en una opción comercialmente eficiente para el sistema.

Síntesis económica: El resultado indica una segmentación diferenciada del mercado. La electromovilidad maximiza la rentabilidad en flotas urbanas de uso intensivo, mientras que los e-fuels aparecen como una solución más viable para el transporte de carga pesada, larga distancia y el parque vehicular existente, donde el recambio tecnológico implica elevados costos de inversión inicial y la pérdida del

valor residual de los activos actuales, generando barreras económicas significativas para la adopción inmediata de nuevas tecnologías.

8.3 Resultados de la evaluación socioambiental

La aplicación del enfoque Triple Bottom Line revela que la transición energética presenta impactos diferenciados; genera ganadores y perdedores territoriales y ambientales que el mercado no está internalizando.

8.3.1 Desplazamiento del impacto ambiental

El cruce con la evidencia de Vera et al. (2023) confirma una externalidad relevante en origen.

- Hallazgo: Una estrategia nacional basada 100% en baterías de litio implica una mayor demanda sobre los recursos hídricos sobre la cuenca del Salar de Atacama. El resultado es una compensación entre impactos ambientales: se reducen las emisiones de CO2 globales y la contaminación local en Santiago, a costa de aumentar el estrés hídrico en el norte de Chile.
- Oportunidad de los e-fuels: La producción de combustibles sintéticos en Magallanes o zonas costeras, al utilizar desalinización, presenta una huella hídrica desacoplada de las cuencas críticas, ofreciendo una ruta de descarbonización que podría generar menores impactos socioambientales en origen.

8.3.2 Segregación en el acceso

El análisis espacial basado en Vergara-Perucich y Boano (2022) demuestra que la electromovilidad de mercado podría reproducir patrones de desigualdad.

- Hallazgo: La infraestructura de carga pública y la adopción temprana se concentran en comunas de altos ingresos (20% de la población con mayores recursos económicos), dejando rezagadas a las zonas periféricas y rurales. El resultado es que la electromovilidad, bajo el modelo actual, presenta barreras de acceso asociadas al nivel de ingresos. Los e-fuels, al aprovechar la capilaridad universal de las estaciones de servicio, podrían constituir una alternativa o complemento con mayor cobertura territorial para democratizar el acceso a la descarbonización en el corto plazo, permitiendo que usuarios de regiones y zonas rurales participen de la transición sin esperar inversiones de infraestructura de largo plazo.

8.4 Síntesis

Como resultado integrador de la investigación, se ha configurado una matriz que define el rol óptimo de cada tecnología según el segmento, buscando un equilibrio entre las dimensiones de sostenibilidad integral:

1. Segmentos con mayor viabilidad para electrificación: Transporte público urbano, flotas de delivery y vehículos particulares de alto recorrido en zonas metropolitanas. Aquí, el ahorro operativo y la reducción de ruido/smog justifican la inversión en infraestructura.

2. Segmentos con mayor viabilidad para e-fuels: Transporte de carga interurbana, maquinaria forestal/minera, aviación y parque vehicular histórico. Aquí, la densidad energética y la necesidad de evitar activos varados hacen que el combustible sintético sea la una de las alternativas más viables desde el punto de vista financiero y técnico.

3. Zona de hibridez: Vehículos particulares de uso medio en zonas con red eléctrica débil. Aquí, ambas tecnologías competirán o se complementarán (ej. híbridos enchufables usando e-fuels), dependiendo de la evolución de los impuestos al carbono y los subsidios a la compra.

4. Zona de transición pasiva: Corresponde a vehículos particulares urbanos con recorridos menores a 30 km/día. En este segmento, el ahorro operativo de la electricidad es insuficiente para amortizar el sobreprecio del vehículo eléctrico dentro de su vida útil. Desde la óptica de la gestión de activos, acelerar el reemplazo de estos vehículos antes de su fin de vida útil técnica podría generar pérdidas de valor económico. El costo hundido del vehículo actual y su bajo costo marginal de operación superan los beneficios de una inversión de capital en tecnología nueva para recorridos tan acotados. El análisis indica que forzar la electrificación aquí es ineficiente; una estrategia potencialmente más eficiente es incentivar vehículos híbridos o citycars eléctricos pequeños, o bien, mantener el parque a combustión eficiente hasta que la curva de costos de las baterías alcance la paridad natural de precios, ya que el impacto marginal en emisiones de este segmento es menor comparado con el transporte público o de carga.

En conclusión, los resultados sugieren limitaciones en enfoques basados en una única tecnología. La viabilidad de la transición chilena depende de la capacidad del Estado y el mercado para orquestar un mix tecnológico donde la electricidad y los combustibles sintéticos atiendan a los segmentos donde presentan mayores ventajas relativas desde una perspectiva de asignación de capital y equidad distributiva territorial.

9. CONCLUSIONES

La presente investigación se propuso evaluar la viabilidad estratégica de una transición energética mixta para el transporte en Chile, analizando críticamente la tendencia a considerar la electrificación masiva como la principal estrategia para la descarbonización del sector. A través de la sistematización de la evidencia

internacional, el diagnóstico de brechas locales y la aplicación de un modelo de evaluación de sostenibilidad integral, los resultados sugieren que la transición energética en el transporte no responde exclusivamente a una lógica de sustitución tecnológica, sino a una complementariedad entre distintas soluciones.

En primer lugar, desde una dimensión económica, se observa una segmentación del mercado, donde la electromovilidad resulta más competitiva en flotas urbanas de uso intensivo, mientras que los combustibles sintéticos presentan características comparativamente favorables en el transporte pesado, larga distancia y en la protección del valor económico del parque vehicular vigente, evitando la destrucción de capital que implicaría la generación masiva de activos varados. Esta diferenciación responde a las estructuras de costos, barreras de inversión y condiciones operativas propias de cada segmento.

En segundo lugar, desde una dimensión ambiental, se identifican diferencias relevantes en términos de eficiencia energética, uso de recursos y huella de infraestructura. Mientras la electrificación presenta ventajas en eficiencia energética, los combustibles sintéticos presentan mayor flexibilidad de implementación y menor presión sobre la expansión inmediata de las redes de distribución urbana y puntos de carga local, especialmente en contextos territoriales con limitaciones estructurales.

En tercer lugar, desde una dimensión social, la investigación evidencia que la electrificación masiva puede generar brechas de acceso vinculadas a la infraestructura de carga y a los costos de inversión inicial, mientras que los combustibles sintéticos podrían facilitar una transición más gradual al aprovechar la infraestructura existente y reducir barreras de adopción para usuarios con menor capacidad de inversión.

En conjunto, estos resultados evidencian que la transición energética en el transporte no puede entenderse como un proceso de optimización única, sino como un equilibrio entre dimensiones económicas, ambientales y sociales, donde distintas tecnologías cumplen roles complementarios según las características del segmento, el territorio y el horizonte temporal de implementación.

9.1 Conclusión general

La presente investigación permite concluir que una estrategia de descarbonización del transporte en Chile basada de manera predominante en la electrificación directa presenta desafíos económicos, operacionales y de infraestructura para la realidad estructural del país. Si bien el vehículo eléctrico presenta ventajas termodinámicas y de eficiencia energética, su implementación como solución universal enfrenta restricciones relevantes asociadas a la capacidad del sistema eléctrico, la distribución territorial de la infraestructura y los costos de inversión inicial.

El análisis económico identificó además una "zona de transición pasiva" en el segmento de transporte particular urbano de bajo recorrido, donde la inversión en electromovilidad no logra amortizarse en horizontes razonables. En estos casos, una sustitución tecnológica acelerada podría generar ineficiencias económicas y acelerar la obsolescencia de activos funcionales, afectando especialmente a usuarios de menores ingresos.

Asimismo, el estudio detectó el riesgo de subsidio cruzado regresivo asociado al financiamiento de infraestructura eléctrica mediante tarifas generales, lo que podría trasladar los costos de la transición energética hacia usuarios con menor capacidad económica. Este resultado sugiere la conveniencia de una estrategia gradual y segmentada que considere tanto la eficiencia económica como la equidad social.

En consecuencia, la transición hacia una movilidad sostenible no necesariamente debe plantearse como una competencia de "suma cero" entre la electrificación directa y los combustibles sintéticos, sino como un portafolio de inversión diversificado. En este modelo híbrido, el hidrógeno verde aparece como un recurso estratégico transversal, tanto por su función habilitante en la producción de e-fuels como por su potencial de aplicación en sectores donde las limitaciones de autonomía, peso o demanda energética dificultan la electrificación directa. Bajo esta lógica, los combustibles sintéticos no solo constituyen una tecnología de transición temporal, sino un componente potencialmente relevante para descarbonizar el parque vehicular existente y los sectores difíciles de electrificar, permitiendo reducir emisiones sin requerir transformaciones inmediatas de gran escala en el sistema energético nacional.

De este modo, se concluye que una de las estrategias potencialmente más viables para la realidad chilena corresponde a un modelo híbrido de transición energética, basado en la complementariedad tecnológica entre electrificación directa y e-fuels, que permita equilibrar eficiencia económica, viabilidad técnica y equidad territorial.

9.2 Conclusiones por dimensión estratégica

Los resultados obtenidos permiten identificar implicancias estratégicas diferenciadas para la transición energética del transporte en Chile, estructuradas en tres dimensiones principales: viabilidad económica, capacidad de infraestructura y sostenibilidad socioambiental. Este enfoque evidencia que la adopción tecnológica no responde necesariamente a una solución única, sino a una lógica de complementariedad estratégica entre distintas alternativas energéticas.

1. Viabilidad económica y financiera

El análisis comparativo de costos (LCOE vs. TCO) pone en discusión la noción de que existe una alternativa universalmente más eficiente en costos. Los resultados permiten identificar diferencias relevantes de rentabilidad:

- Para el operador intensivo: La electromovilidad presenta mayores niveles de viabilidad económica en flotas de alto recorrido y utilización intensiva (buses, taxis y transporte urbano continuo), donde el ahorro operativo acumulado permite amortizar la alta inversión inicial dentro de horizontes de tiempo financieramente razonables. Sin embargo, esta viabilidad depende significativamente de la disponibilidad de crédito barato, hoy escaso para las PYMES, dada la persistencia de restricciones en el acceso al financiamiento para emprendedores reportadas por la ANAC (2024).
- Para el patrimonio privado: Los e-fuels pueden representar una alternativa eficiente en términos de asignación de capital para el usuario promedio y el transporte de carga. Al permitir el uso de vehículos convencionales, pueden actuar como un mecanismo de mitigación de riesgo financiero, evitando la obsolescencia anticipada de activos. Se concluye que, aunque el litro de combustible sintético sea más caro que la electricidad, su capacidad para evitar el endeudamiento por renovación de flota lo convierte en una herramienta potencialmente relevante para la estabilidad económica de los hogares y empresas de menor tamaño durante la transición.

2. Capacidad de infraestructura (oferta)

El diagnóstico de la red de distribución confirma que el sistema eléctrico chileno, en su configuración actual, presenta limitaciones de capacidad física que podrían transformarse en un desafío relevante ante escenarios de electrificación masiva. Los antecedentes analizados sugieren que el cumplimiento de las metas de electrificación proyectadas para 2035 requerirá inversiones significativas en infraestructura de distribución, cuyos costos e impactos sobre el sistema deben ser considerados en la planificación de largo plazo. En este contexto, una expansión acelerada de la electromovilidad sin el desarrollo paralelo de la infraestructura necesaria podría generar presiones adicionales sobre la red eléctrica y aumentar los costos asociados a su fortalecimiento.

Al mismo tiempo, los combustibles sintéticos presentan características que podrían complementar el proceso de descarbonización, dado que permiten aprovechar parte importante de la infraestructura de distribución actualmente existente. En consecuencia, los resultados sugieren que la viabilidad de una transición energética efectiva dependerá no solo del desempeño tecnológico de cada alternativa, sino también de la capacidad del sistema para gestionar sus requerimientos de infraestructura, costos de implementación y efectos territoriales.

3. Sostenibilidad socioambiental

Desde la perspectiva de la sostenibilidad integral, los resultados sugieren que la neutralidad de carbono no implica ausencia de impactos ambientales o territoriales.

- Equidad territorial: La evidencia demuestra que el modelo actual de electromovilidad puede reproducir patrones de segregación, concentrando sus beneficios en las comunas de altos ingresos que pueden costear la tecnología y poseen la infraestructura de carga. Se concluye que los e-fuels pueden contribuir a ampliar el acceso territorial a procesos de descarbonización, llevando la reducción de emisiones a zonas rurales y regiones extremas que hoy están excluidas del mapa de la electromovilidad.
- Responsabilidad en origen: Se identifica un trade-off socioambiental relevante. La ruta 100% eléctrica presiona los recursos hídricos del norte de Chile, mientras que la ruta de los e-fuels en el sur puede operar con agua desalinizada y energía eólica. Se concluye que una matriz diversificada permite distribuir la carga ambiental, reduciendo el riesgo de generar nuevas presiones de "zonas de sacrificio" hídrico.

En conjunto, estas dimensiones respaldan la viabilidad de adoptar un modelo híbrido de transición energética, donde la electrificación directa y los combustibles sintéticos operen de manera complementaria, permitiendo equilibrar eficiencia económica, viabilidad técnica y equidad territorial en el proceso de descarbonización del transporte chileno.

9.3 Síntesis final

En síntesis, la presente investigación sugiere que Chile reúne condiciones favorables para avanzar en la descarbonización del transporte mediante una estrategia que combine distintas alternativas tecnológicas, en lugar de depender exclusivamente de una única solución. En este contexto, la electromovilidad presenta ventajas relevantes para aplicaciones urbanas y de uso intensivo, mientras que el hidrógeno verde se consolida como el recurso estratégico transversal que viabiliza este modelo mixto: operando simultáneamente como vector de aplicación directa (celdas de combustible) y como precursor esencial para la producción de e-fuels. Por su parte, los combustibles sintéticos ofrecen una alternativa potencial para segmentos donde la electrificación enfrenta mayores barreras técnicas o económicas, particularmente en el transporte de larga distancia, de carga pesada y en el parque vehicular existente. En conjunto, la evidencia analizada sugiere que un enfoque complementario podría contribuir a una transición más flexible, gradual y adaptada a las características estructurales del país.

10. RECOMENDACIONES

A la luz de las conclusiones obtenidas y con el objetivo de avanzar desde el diagnóstico hacia propuestas de implementación, se proponen los siguientes lineamientos estratégicos para articular una transición energética mixta en Chile.

Estas recomendaciones se estructuran como una hoja de ruta escalonada para actores públicos y privados.

10.1 Recomendaciones de política pública

El rol del Estado no debiera centrarse en favorecer exclusivamente una tecnología, sino abordar las fallas de mercado que impiden la competencia eficiente y equilibrio distributivo.

A. Corto plazo (1-3 años)

Para estimular la adopción inicial del mercado y reducir las barreras asociadas a la inversión inicial identificada en el análisis financiero:

1. Creación de un fondo de garantía estatal para electromovilidad (fogape-verde): Se recomienda diseñar un instrumento de cobertura de riesgo específico para PYMES de transporte (taxis, colectivos, delivery). Dado que la banca tradicional percibe la tecnología como riesgosa, el Estado podría actuar como aval parcial, reduciendo la tasa de interés de los créditos para la compra de vehículos eléctricos, facilitando que el ahorro operativo contribuya al financiamiento del vehículo. Respecto al impacto fiscal de esta medida, resulta relevante precisar que el costo para el Estado no representa un desembolso directo por el valor de los activos, sino la constitución de un pasivo contingente. Bajo un modelo de apalancamiento financiero típico de FOGAPE (con un multiplicador de 10x), un aporte de capital inicial de USD 50 millones permitiría garantizar créditos por hasta USD 500 millones. El costo real para el erario no es el monto total garantizado, sino la provisión por la Pérdida Esperada de la cartera. Si se considera una tasa de incumplimiento histórica referencial para PYMES bajo esquemas FOGAPE en torno al 4% al 5%, y se asume una severidad de pérdida (Loss Given Default) conservadora, el costo fiscal esperado para el Estado se situaría entre USD 15 y 25 millones. Este valor representa el verdadero pasivo contingente a provisionar, el cual podría ser incluso menor dado que el ahorro operativo de la tecnología eléctrica contribuye a mejorar los flujos de caja y la capacidad de pago del beneficiario. De esta forma, el Fogape verde podría actuar como un catalizador de inversión privada con un uso focalizado de los recursos fiscales.

   No obstante, la implementación de este tipo de instrumentos financieros exige considerar cuidadosamente sus implicancias fiscales. En este sentido, un mecanismo de garantía pública podría orientarse inicialmente hacia sectores con mayores dificultades de acceso al financiamiento, como las PYMES de transporte, logística y flotas comerciales, incorporando límites de cobertura y criterios de evaluación de riesgo. Una implementación gradual permitiría monitorear su desempeño y ajustar su alcance conforme

evolucione el mercado, contribuyendo a equilibrar los objetivos de transición tecnológica con la sostenibilidad fiscal de largo plazo.

2. Implementación de un piloto regulatorio para e-fuels: Antes de una regulación masiva, se sugiere habilitar zonas de prueba donde se autorice la venta comercial de combustible sintético con exención parcial del impuesto específico a los combustibles (IEC), para testear la elasticidad de la demanda y validar la logística de distribución en condiciones reales.

B. Mediano plazo (3-7 años)

Para corregir las distorsiones de precios relativas entre tecnologías limpias y fósiles:

1. Reforma tributaria verde (impuesto al carbono): Se recomienda aumentar gradualmente el impuesto a las emisiones de fuentes fijas y móviles, acercándolo a los estándares OCDE para 2030 (>60 EUR/tCO2), nivel considerado como el piso mínimo para cumplir con los objetivos de carbono neutralidad. El objetivo central de esta política es la internalización del costo social de las emisiones fósiles; como consecuencia directa de esta corrección del mercado, se logra hacer competitivas a las alternativas limpias. Esto podría contribuir a que los e-fuels (cuyo costo de producción es mayor) puedan competir en precio final contra los combustibles fósiles, incorporando los costos ambientales de esta última.

2. Norma de estándar de cartera para flotas públicas: Establecer por ley que toda licitación de transporte público o vehículos fiscales deba evaluar las ofertas considerando el costo total de propiedad (TCO) y no solo el precio de compra. Esto podría favorecer a la electromovilidad en usos intensivos sin necesidad de subsidios directos, debido a criterios asociados al costo total de operación.

C. Largo plazo (>7 años)

Para promover criterios de sostenibilidad social y reducir brechas territoriales:

1. Mandato de cobertura universal de carga: Al igual que se exige cobertura en telecomunicaciones, las licitaciones de infraestructura de carga pública deben incluir obligaciones de cobertura en zonas de baja rentabilidad (comunas periféricas y rurales), financiadas mediante subsidios cruzados desde las zonas de alta demanda.

2. Ley de responsabilidad extendida para baterías: Se propone implementar una normativa específica que actualice la actual Ley 20.920, elevando las exigencias para los importadores de vehículos eléctricos. Esta versión 2.0 obligaría no solo a la recolección, sino a financiar la certificación y logística para la segunda vida de las baterías antes de su reciclaje final, promoviendo mayores niveles de circularidad del activo.

10.2 Recomendaciones para el sector privado

Para las empresas, la transición no es solo un desafío regulatorio, sino también competitivo.

1. Para operadores de flota y logística:

    - Adoptar modelos de vehículo como servicio: Se recomienda transitar desde la compra de activos hacia el arrendamiento operativo, trasladando parte del riesgo tecnológico y de obsolescencia de la batería a empresas especializadas.
    - Segmentación inteligente: Evitar estrategias de electrificación homogénea. Utilizar vehículos eléctricos para la última milla urbana y mantener/renovar flotas a combustión con uso de e-fuels (o mezclas graduales) para el transporte interurbano y de carga pesada.

2. Para la industria energética y distribuidoras:

    - Evolución de las gasolineras: Las distribuidoras de combustible actuales podrían evolucionar hacia modelos de hubs energéticos multimodales, ofreciendo carga rápida eléctrica y venta de e-fuels en el mismo punto, aprovechando su infraestructura y ubicación existente.

      En términos operativos, esta transición no implica la sustitución inmediata de los productos tradicionales. Debido a la cualidad drop-in de los combustibles sintéticos —que los hace químicamente compatibles con la infraestructura actual — las estaciones de servicio pueden ofrecer ambos tipos de combustible simultáneamente. Esto permite implementar estrategias de mezclas graduales en los mismos tanques de almacenamiento o destinar surtidores específicos para combustibles 100% sintéticos. Esta coexistencia puede resultar relevante para contribuir a la continuidad del suministro mientras el mercado de los e-fuels alcanza la escala necesaria para reducir progresivamente la participación de derivados del petróleo.

      Durante la transición energética, las estaciones de servicio no reemplazarán inmediatamente los combustibles fósiles, sino que evolucionarán hacia modelos de operación mixtos, donde convivirán gasolina tradicional, combustibles sintéticos y servicios de carga eléctrica. Esto permitirá una adaptación gradual de la infraestructura y podría reducir el riesgo de activos varados para el sector privado.

10.3 Recomendaciones para futuras líneas de investigación

Dado el carácter exploratorio de esta memoria, se identifican áreas que futuras investigaciones podrían abordar para profundizar este campo:

1. Modelación de la red en regiones: Replicar el estudio de impacto en distribución eléctrica (realizado por Braga para Santiago) en ciudades intermedias del sur de Chile, donde la calefacción eléctrica utiliza la misma infraestructura de distribución.
2. Análisis de sensibilidad del litio: Investigar cómo la fluctuación del precio internacional del litio y las nuevas tecnologías de baterías podrían modificar la estructura de costos proyectada en este estudio.
3. Aceptación del consumidor: Realizar estudios de mercado cuantitativos para medir la disposición a pagar de los chilenos por un combustible sintético carbono-neutral versus las barreras asociadas al cambio de hábitos de carga en la electromovilidad.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Agencia de Sostenibilidad Energética. (2025). Bases para la economía circular de baterías de ion litio en electromovilidad. Santiago: AgenciaSE.
- ANAC. (2024). Informe del Mercado Automotor: Cierre anual diciembre 2023. Asociación Nacional Automotriz de Chile.
- Braga Muñoz, A. E. (2020). Electrificación del transporte: buses eléctricos y el sistema de distribución. (Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico). Universidad de Chile, Santiago. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/175421
- Breuer, J. L., Scholten, J., Koj, J. C., Schorn, F., Fiebrandt, M., Samsun, R. C., Albus, R., Görner, K., Stolten, D. & Peters, R. (2022). An Overview of Promising Alternative Fuels for Road, Rail, Air, and Inland Waterway Transport in Germany. Energies, 15(4), 1443.
- Buchenberg, P., Addanki, T., Franzmann, D., Winkler, C., Lippkau, F., Hamacher, T., ... & Blesl, M. (2023). Global Potentials and Costs of Synfuels via Fischer-Tropsch Process. Energies, 16(4), 1976.
- CNE. (2024). Anuario Estadístico de Energía 2023. Comisión Nacional de Energía.
- Cornejo Rubio, F. R. (2024). Producción de combustibles sintéticos basados en hidrógeno verde para la descarbonización de la zona central de Chile. (Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico). Universidad de Chile, Santiago.
- Elkington, J. (1994). Towards the Sustainable Corporation: Win-Win-Win Business Strategies for Sustainable Development. California Management Review, 36(2), 90–100.
- Geels, F. W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. Research Policy, 31(8-9), 1257-1274.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2018). Metodología de la investigación (6a ed.). México: McGraw-Hill.

- IEA. (2024). Global EV Outlook 2024: Moving towards increased affordability. Paris: International Energy Agency.
- INE. (2024). *Más vehículos en Chile: permisos de circulación crecieron 4,6% en el 2023*. Nota de Prensa. Santiago: Instituto Nacional de Estadísticas. Recuperado de: (https://www.ine.gob.cl/sala-de-prensa/prensa/general/noticia/2024/09/13/m%C3%A1s-veh%C3%ADculos-en-chile-permisos-de-circulaci%C3%B3n-crecieron-4-6-en-el-2023#:~:text=M%C3%A1s%20veh%C3%ADculos%20en%20Chile:%20permisos,4%2C6%25%20en%20el%202023).
- Martínez Barahona, P. A. (2024). Evaluación técnico-económica para la electrificación de la flota de vehículos en Uber. (Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico). Universidad de Chile, Santiago.
- Mori, S., Nishiura, O., Oshiro, K., & Fujimori, S. (2024). Synthetic fuels mitigate the risks associated with rapid end-use technology transition in climate mitigation scenarios. Global Environmental Change Advances, 2, 100009.
- OECD. (2023). Effective Carbon Rates 2023: Pricing Greenhouse Gas Emissions Through Taxes and Emissions Trading. OECD Series on Carbon Pricing and Energy Taxation. Paris: OECD Publishing.
- Orias-Rodríguez, S., González-Hernández, J., & González-Flores, D. (2024). Perspectiva global de los combustibles sintéticos verdes: tecnologías, avances y desafíos en la transición energética. Revista de Química PUCP, 38.
- Ortega, L. (2023). Análisis de la cadena de valor del hidrógeno verde y su potencial exportador en la Región de Magallanes. (Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial). Universidad de Chile, Santiago.
- Styring, P., Duckworth, E. L., & Platt, E. G. (2021). Synthetic Fuels in a Transport Transition: Fuels to Prevent a Transport Underclass. Frontiers in Energy Research, 9, 707867.
- Vera, M. L., Torres, W. R., Galli, C. I., Chagnes, A., & Flexer, V. (2023). Environmental impact of direct lithium extraction from brines. Nature Reviews Earth & Environment, 4, 149–165.
- Vergara-Perucich, J. F., & Boano, C. (2022). La electromovilidad en Santiago de Chile: entre la innovación y la desigualdad socioespacial. Revista EURE - Revista De Estudios Urbano Regionales, 48(145), 123-145.
- Zagorodny, J. P. (2023). Gestión integral de las baterías fuera de uso de vehículos eléctricos en el marco de una estrategia de economía circular. Serie Medio Ambiente y Desarrollo, No. 173. Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Zapata Barrientos, A. N. (2022). Impacto de electrificación de buses del transporte público de Santiago sobre el sistema eléctrico nacional. (Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico). Universidad de Chile, Santiago.

12. ANEXOS

ANEXO A: FICHA TÉCNICA COMPARATIVA DE TECNOLOGÍAS

Este anexo resume las especificaciones técnicas y operativas utilizadas para el análisis comparativo en el Capítulo 7, contrastando la electromovilidad directa con los vehículos a combustibles sintéticos.

Variable	Vehículo eléctrico a batería	Vehículo a combustible sintético
Fuente de energía	Electricidad almacenada en baterías de iones de litio.	Hidrocarburo líquido sintético (e-fuel) producido vía Fischer-Tropsch o Metanol-to-Gasoline.
Eficiencia "pozo a la rueda"	Alta (~70-80%): Mínimas pérdidas en transporte y conversión motor.	Baja (~10-15%): Altas pérdidas termodinámicas en la electrólisis y síntesis química.
Densidad Energética	Baja. Requiere baterías pesadas para autonomías largas, reduciendo la carga útil en camiones.	Alta. Equivalente a la gasolina/diésel fósil, ideal para transporte de carga pesada.
Infraestructura de carga	Requiere cargadores de alta potencia (Electrolineras) y refuerzo de red eléctrica.	Utiliza la infraestructura existente de estaciones de servicio y camiones cisterna (Drop-in).
Tiempo de recarga	30 minutos a varias horas (dependiendo de la potencia del cargador).	< 5 minutos (equivalente al repostaje convencional).
Emisiones locales	Cero emisiones en el tubo de escape. Reducción de ruido urbano.	Emisiones de NO_x y material particulado (menores que fósiles, pero existentes). Carbono neutral en ciclo de vida.

Madurez (TRL)	TRL 9: Despliegue comercial masivo global.	TRL 8-9: Demostración industrial consolidada y escalamiento (Haru Oni produce de forma estable a 2026).

ANEXO B: FORMULACIÓN DE MODELOS ECONÓMICOS

Detalle de las fórmulas matemáticas utilizadas para la evaluación de competitividad financiera en la sección 7.4.

1. Costo nivelado de energía (LCOE - Levelized Cost of Energy)

Métrica utilizada para determinar el costo unitario de producción del e-fuel, considerando la vida útil de la planta de electrólisis y síntesis. Se calcula como el valor presente de los costos dividido por la producción energética total.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^{n} \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{n} \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

Donde:

- I_t: Gastos de inversión (CAPEX) en el año t.
- M_t: Gastos de operación y mantenimiento (OPEX) en el año t.
- F_t: Gastos de insumos o combustible (si aplica).
- E_t: Energía (o litros de combustible) generada en el año t.
- r: Tasa de descuento (WACC).
- n: Vida útil del proyecto.

2. Costo total de propiedad (TCO - Total Cost of Ownership)

Indicador utilizado para evaluar la rentabilidad desde la perspectiva del usuario final. Permite determinar el punto de equilibrio entre un vehículo eléctrico y uno convencional.

$$TCO = CAPEX + \sum_{t=1}^{T} \frac{Combustible_t + Mantención_t + Seguros_t + Impuestos_t}{(1+r)^t} - \frac{Valor\ residual}{(1+r)^T}$$

Donde:

- CAPEX: Precio de compra del vehículo (incluyendo baterías).
- Combustible: Gasto anual en electricidad o e-fuel (dependiendo de la eficiencia km/kWh o km/litro).

- Valor Residual: Precio de reventa del vehículo al final del periodo T.

ANEXO C: NIVELES DE MADUREZ TECNOLÓGICA (TRL)

Escala estandarizada utilizada en la matriz de sistematización crítica (Sección 7.1) para clasificar el estado de desarrollo de las soluciones energéticas en Chile.

- TRL 1-3 (Investigación): Principios básicos observados y prueba de concepto experimental. (Fase actual de nuevas químicas de baterías).
- TRL 4-6 (Desarrollo): Validación de componentes en laboratorio y entorno relevante.
- TRL 7 (Demostración): Prototipo del sistema demostrado en entorno operativo real. (Etapa piloto inicial de los e-fuels, como Haru Oni en 2022).
- TRL 8 (Pre-comercial): Sistema completo calificado a través de pruebas y demostraciones. (Estado actual de los e-fuels: Haru Oni, con producción estable y escalamiento hacia Cabo Negro).
- TRL 9 (Despliegue): Sistema probado con éxito en entorno real y disponible comercialmente. (Estado actual de buses eléctricos y cargadores).

ANEXO D: RESUMEN ANALÍTICO DE REFERENCIAS Y FUENTES ESTRATÉGICAS

El presente anexo ofrece una síntesis detallada de las fuentes documentales y empíricas que constituyen la base de esta investigación, estructuradas según su aporte a las dimensiones económica, técnica y social del estudio.

1. Pilares de viabilidad económica y financiera

La evaluación de la rentabilidad privada y social se sustenta principalmente en dos fuentes críticas. Por una parte, Martínez Barahona (2024) provee el modelo de Costo Total de Propiedad (TCO) aplicado a flotas comerciales en Chile, permitiendo identificar la barrera de capital inicial que frena la adopción orgánica de la electromovilidad a pesar de su eficiencia operativa. Complementariamente, Mori et al. (2024) introducen el concepto estratégico de riesgo de activos varados, fundamentando la necesidad de los e-fuels como mecanismos de mitigación financiera para evitar la obsolescencia prematura de la infraestructura vehicular existente durante la transición.

2. Restricciones técnicas y de infraestructura

La dimensión técnica se fundamenta en el trabajo de Braga (2020), cuya modelación de la red de distribución eléctrica de Santiago entrega la evidencia empírica necesaria sobre la inelasticidad de la oferta. Esta fuente es vital para sustentar el argumento sobre los costos ocultos de reforzamiento de red requeridos para una carga masiva simultánea. En cuanto a la competitividad de la oferta de combustibles

alternativos, Buchenberg et al. (2023) y los reportes de la IEA (2024, 2025) sitúan a Chile y la Patagonia como zonas con los menores costos nivelados de producción (LCOE) a escala global, validando la ventaja comparativa del país.

3. Sostenibilidad socioambiental y equidad territorial

La investigación integra una mirada crítica sobre las externalidades a través de Vera et al. (2023), quienes documentan el impacto hídrico de la extracción de litio, permitiendo contrastar la huella ecológica de las baterías frente a la producción de hidrógeno verde. Por otro lado, Vergara-Perucich & Boano (2022) aportan la base sociológica sobre la segregación socioespacial en la adopción tecnológica, evidenciando que la infraestructura de carga tiende a concentrarse en zonas de altos ingresos, lo que refuerza la tesis de que los combustibles sintéticos actúan como una herramienta de democratización y equidad territorial.

4. Validación empírica: Proyecto Haru Oni e HIF Global (2022-2026)

Como pilar práctico, la investigación toma como referencia la evolución del proyecto Haru Oni de HIF Global en Magallanes. Esta fuente operativa demuestra la transición de una fase piloto a un demostrador industrial consolidado que, a mayo de 2026, mantiene producción estable de e-gasolina para mercados de alta gama. Hitos clave documentados incluyen:

- La integración exitosa de tecnología de captura directa de aire (DAC) en 2025, cerrando el ciclo de carbono directamente desde la atmósfera.
- La validación operativa en condiciones extremas mediante el abastecimiento de expediciones antárticas.
- El respaldo financiero de USD 220 millones en 2024 (incluyendo a BID Invest), que sustenta el escalamiento hacia la futura planta de escala comercial Cabo Negro.

5. Marco Regulatorio y Objetivos País

Finalmente, se consideran los lineamientos de la OECD (2023) sobre la tarificación efectiva del carbono como el estándar necesario para internalizar las externalidades de los combustibles fósiles. Esto se vincula directamente con la ley marco de cambio climático de Chile, que establece el compromiso del 100% de carbono neutralidad al 2050, una meta que esta memoria defiende como una decisión estratégica para corregir fallas de mercado y maximizar el valor de la matriz energética limpia nacional.

13. ACRÓNIMOS

- ANAC: Asociación Nacional Automotriz de Chile.
- BEV: Battery Electric Vehicle (Vehículo Eléctrico de Batería).
- CAPEX: Capital Expenditure (Gastos de Capital / Inversión Inicial).
- CEN: Coordinador Eléctrico Nacional.
- CNE: Comisión Nacional de Energía.
- FOGAPE: Fondo de Garantía para Pequeños Empresarios.
- IEC: Impuesto Específico a los Combustibles.
- INE: Instituto Nacional de Estadísticas.
- LCOE: Levelized Cost of Energy (Costo Nivelado de la Energía).
- OPEX: Operational Expenditure (Gastos Operativos).
- PYME: Pequeña y Mediana Empresa.
- REP: Responsabilidad Extendida del Productor.
- ROI: Return on Investment (Retorno sobre la Inversión).
- TBL: Triple Bottom Line (Triple Resultado: Económico, Social, Ambiental).
- TCO: Total Cost of Ownership (Costo Total de Propiedad).
- TRL: Technology Readiness Level (Nivel de Madurez Tecnológica).
- VaaS: Vehicle as a Service (Vehículo como Servicio).