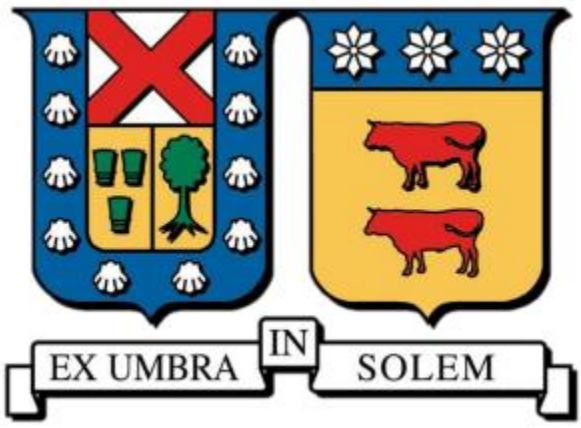
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE AERONÁUTICA

SANTIAGO - CHILE



EVALUACIÓN ECONÓMICA Y OPERACIONAL DE IMPLEMENTACIÓN Y REEMPLAZO DE TRACTORES PUSH-BACK DIÉSEL POR ELÉCTRICOS EN AEROPUERTOS

ETAN KUPFER CONRADS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO EN AVIACIÓN COMERCIAL

PROFESOR GUÍA: MARTINUS POTTERS

PROFESOR CORREFERENTE: LUIS OLIVA

2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: EVALUACIÓN ECONÓMICA Y OPERACIONAL DE IMPLEMENTACIÓN Y REEMPLAZO DE TRACTORES PUSH-BACK DIÉSEL POR ELÉCTRICOS EN AEROPUERTOS

Nombre del candidato(a): Etan Küpfer Conrads

Carrera / Grado: INGENIERÍA EN AVIACIÓN COMERCIAL

Campus: Santiago Vitacura **;** **Departamento**: AERONAUTICA

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

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

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

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

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

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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 28/10/2026 ; **Firma:** _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 28/10/2026 ; **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.

Agradecimientos

A quienes han estado durante todo mi proceso universitario, a quienes siempre estuvieron a mi lado en todo momento, aquellos que siempre prestaron una mano cuando ni ellos tenían una para si mismos. Entre ellos principalmente a mi abuela, que estuvo presente en este proceso, quien me recibió en su casa, me dio un hogar y todo lo necesario para que pudiese trabajar, ofreciendo toda clase de ayudas, a pesar de que rechacé todas. Pero su constante esfuerzo por ayudarme siempre se será la mayor ayuda que pude recibir.

También a mi Mamá, que ella siempre se aseguró que estuviera bien, que tenga todas las herramientas para que pueda estudiar y desarrollarme dentro de la universidad. Asegurándose que siempre estuviera con la frente en alto para llegar hasta el final de todo el proceso universitario.

A los que fueron los mas importantes dentro de la universidad, a mis amigos y compañeros que estuvieron durante periodos cortos, otros que llegaron después y esos que estuvieron toda la etapa. A Alex, Carlo Cristian, Gonzalo e Ignacio que estuvieron toda la etapa, quizá solo desde el principio pero no hasta el final dentro de la universidad, ya que esta me tomó mas tiempo del establecido, pero a pesar de que no estuve con algunos de ellos todo el tiempo, siempre estuvieron presentes. También a Carlos y José, quienes seguir con el resto de la universidad, siendo un apoyo fundamental en trabajos y proyectos, apoyándonos mutuamente en todo el proceso.

Finalmente nuevamente a mi abuela, quien nunca me juzgo ni reprimió por ninguno de mis fracasos en los que no me esforcé, ni me retó por mis eventuales faltas de compromiso con la universidad, ya que su paciencia infinita conmigo me permitió tener la fuerza para llegar al final de este increíble, intenso e importante proceso de mi vida.

Resumen Ejecutivo

Como principal tema, el estudio se basa en la implementación de tractores Push-Back eléctricos en aeropuertos, en base a la necesidad de contrarrestar las emisiones de carbono generadas por la industria aeronáutica. El estudio busca también reducir los costos operacionales y evaluar la capacidad operativa de estos vehículos en términos de tiempo.

Se verá el impacto económico que representa actualmente la industria en base al precio del combustible de estos equipos de tractado. Se sabe que el aumento del valor del diésel ha crecido en un 190% en el periodo de 2016-2026 y seguirá aumentando su precio en el tiempo. Por su contraparte, el auge de los vehículos eléctricos ha presentado una alternativa para las funciones en el área de trabajo del equipo y alcanza el nivel de potencia necesario para llevar a cabo los procesos a un costo más reducido.

Finalmente se compararán las características de los tractores, con sus respectivos costes y tiempos de operación, con base en lo anterior un análisis de cuáles serían los mejores equipos por considerar para su implementación y comprobar si es factible el uso de estos Tractores.

Abstract

The central subject of this study is the implementation of electric Push-Back tractors at airports, arising from the need to counteract the carbon emissions generated by the aviation industry. It is likewise concerned with reducing operational costs and with assessing the operational capacity of these vehicles in terms of working times.

The study examines the economic impact that the industry currently faces because of the fuel price of this towing equipment. The price of diesel rose by 190% between 2016 and 2026 and is expected to keep increasing over time. Conversely, the growth of electric vehicles has emerged as an alternative for the tasks performed in the equipment's working area, reaching the power levels required to carry out these operations at a lower cost.

Finally, the characteristics of the tractors are compared, together with their respective costs and operating times. On this basis, an analysis is carried out to determine which equipment would be the most suitable to consider for implementation, and to verify whether the use of these tractors is feasible.

Índice

Índice de Ilustraciones 7

I. Introducción 9

II. Glosario 9

1. Capítulo I: Antecedentes Generales 10

1.1. Justificación del Tema 10

1.2. Objetivos 11

1.2.1. Objetivo General 11

1.2.2. Objetivos Específicos 11

1.3. Metodología 11

1.4. Alcance 12

2. Capítulo II: Estado del Arte 14

2.1. Antecedentes 14

2.1.1. Origen y desarrollo 14

2.1.2. Características de los tractores 16

2.1.2.1. Modelos de referencia con barra de tiro: »BISON« 620 y Challenger 280 ... 17

2.1.3. Operación: empuje y remolque de aeronaves 19

2.1.4. Electricidad en el transporte 22

2.1.5. Evolución del transporte eléctrico 24

2.1.6. Uso de tractores eléctricos en el mundo 29

2.1.7. Regulaciones y normativas 30

2.1.8. Situación Ambiental 32

2.2. Marco Teórico 35

2.2.1. Descripción de Equipos 35

2.2.2. Autos Eléctricos 37

2.2.3. Precios de autos con sus dos variantes 39

Valores documentados para equipos de apoyo en tierra 39
Contraste con el mercado automotriz. 40
2.2.4 Combustión interna vs electricidad en el costo y autonomía 43
2.2.5 Regresión Lineal 46
2.2.6 Modelo de costo global 47
2.3 Propuesta Metodológica 48
Primera etapa: sensibilidad del precio de los equipos. 48
Segunda etapa: proyección de los precios de la energía. 48
Tercera etapa: determinación de las horas operacionales. 49
Cuarta etapa: evaluación mediante el modelo de costo global. 49
3. Capítulo III: Desarrollo 50
3.1. Marco de precio 50
3.1.1. Precio de referencia del equipo 50
3.1.2. Escenarios de precio y sobreprecio de electrificación 51
3.1.3. Estructura del CAPEX en Chile 53
3.2. Caracterización operacional 55
3.2.1. Horas de operación 55
3.2.2. Consumo energético de ambas tecnologías 56
3.3. Proyección de los precios de la energía 58
3.4. Modelo de costo global 61
3.4.1. Costos operacionales anuales 62
3.4.2. Reemplazo de baterías y valor residual 63
3.4.3. Flujo de costos y valor presente 65
3.5. Comparación de resultados y criterio de decisión 67
3.6. Análisis de sensibilidad 68
3.7. Escalamiento, limitaciones y alternativas 71

Escalamiento a una flota 71

Escalamiento por capacidad del equipo 71

Limitaciones del estudio 72

Alternativas no desarrolladas. 73

3.8. Síntesis de resultados 73

Conclusión 75

Bibliografía 79

Anexo 85

Índice de Ilustraciones

Gráfico 1: Evolución de las ventas globales del transporte eléctrico. 23

Gráfico 2: Parque circulante mundial de automóviles eléctricos (2015–2024) 26

Gráfico 3: Evolución del valor del mercado mundial de vehículos eléctricos 27

Gráfico 4: Evolución de la venta de vehículos eléctricos y electrificados en Chile (2021–2025). 28

Gráfico 5: Evolución del precio del petróleo diésel en Chile (2016–2026) 31

Gráfico 6: Emisiones globales de CO_2 de la aviación comercial (2019–2025) 33

Gráfico 7: Emisiones comparadas de CO_2 entre GSE diésel y GSE eléctrico 34

Gráfico 8: Trayectoria proyectada de los precios de la energía (2026–2036) 61

Gráfico 9: Sensibilidad del sobreprecio máximo admisible a cada parámetro 69

Imagen 1: Hanomag tipo R 455 ATK de 1952 14

Imagen 2: Magirus-Deutz del tipo "Orion 250" de 1960 15

Imagen 3: Goldhofer Phoenix E 16

Imagen 4: Goldhofer Bison E 620 17

Imagen 5: Trepel Challenger 280 17

Imagen 6: Hyundai KONA SX2 1.6T AT 4WD N-Line 37

Imagen 7: Hyundai KONA SX2 EV GO LR 38

Imagen 8: Toyota Hilux 4x4 2.8 AT 41

Imagen 9: Toyota Hilux BEV AWD 42

Tabla 1: Comparación de los pares diésel-eléctrico »BISON« 620 y Challenger 280 18
Tabla 2: Uso de equipos de apoyo en tierra eléctricos en Ámsterdam-Schiphol y Salt Lake City 30
Tabla 3: Estructura tributaria del petróleo diésel en Chile 31
Tabla 4: Especificaciones técnicas comparadas »BISON« D 620 y BISON E 620 36
Tabla 5: Versiones del Hyundai Kona disponibles en el mercado chileno 38
Tabla 6: Inversión en equipos de apoyo en tierra según tipo de propulsión 39
Tabla 7: Precios del Hyundai Kona por variante de propulsión 40
Tabla 8: Precios de la Toyota Hilux por variante de propulsión 41
Tabla 9: Comparación del Hyundai Kona en sus dos variantes de propulsión 44
Tabla 10: Escenarios de precio del tractor diésel en origen 50
Tabla 11: Precio en origen estimado del tractor eléctrico según escenario y razón de sobreprecio 51
Tabla 12: Inversión inicial desglosada por escenario, caso base (razón 1,12) 54
Tabla 13: Horas efectivas de operación anual según factor de utilización 56
Tabla 14: Consumo y costo energético horario según factor de carga 57
Tabla 15: Proyección de los precios de la energía, 2027-2036 60
Tabla 16: Costos operacionales anuales y ahorro proyectado 62
Tabla 17: Reemplazo de batería y valores residuales 64
Tabla 18: Valor presente del ahorro operacional 65
Tabla 19: Comparación del sobreprecio requerido con el umbral admisible 67
Tabla 20: Sensibilidad univariante del sobreprecio máximo admisible 69
Tabla 21: Efecto del prorrateo de la infraestructura de carga 71
Tabla 22: Síntesis de los resultados del Capítulo III 74

I. Introducción

En la búsqueda constante de sostenibilidad y eficiencia operativa, las empresas y aeropuertos están explorando soluciones innovadoras para reducir su huella de carbono y optimizar sus operaciones diarias. Una de estas soluciones es la implementación de tractores Push-Back eléctricos, vehículos utilizados para mover aeronaves desde las puertas de embarque hacia calles de rodaje, remolcar aeronaves dentro del aeropuerto desde y hacia la base de mantenimiento y de ser necesario hasta el umbral de pista. Este estudio tiene como objetivo evaluar la factibilidad del uso de estos tractores eléctricos desde una perspectiva económica y operacional.

El análisis económico se centra en comparar los costos operacionales de tractores eléctricos frente a sus contrapartes diésel, así como en la proyección de ahorros a largo plazo en términos de consumo de energía y reducción de costes de operación.

Desde el punto de vista operacional, el estudio examina los tiempos de carga y autonomía de los tractores eléctricos, su capacidad para operar en comparación con la de los tractores de combustión interna, evaluar los tiempos de operación en la plataforma y comparar el ahorro de electricidad en contraste con el diésel.

Este análisis busca proporcionar una visión integral de los beneficios y desafíos asociados con la adquisición de tractores Push-Back eléctricos, ofreciendo a los inversores de decisiones en la industria aeroportuaria una base sólida para evaluar la viabilidad de esta tecnología de energía limpia

II. Glosario

IATA: International Air Transport Association (Asociación International de Trasporte Aéreo)

GSE: Ground support equipment (Equipos de soporte en tierra)

Push-Back: Tractores de remolque y tractado Push-Back

TWT: Towbar tractor (tractor con barra de tractado/remolque)

TWL: Towbarless tractor (tractor sin barra de tractado)

1. Capítulo I: Antecedentes Generales

1.1. Justificación del Tema

Para contextualizar la decisión de implementar estos tractores, se remonta a la industria a la que pertenece esta maquinaria que es la aeronáutica. Para dar a entender la implementación de estos, se tiene que considerar que la industria aeronáutica representa el 2 a 3% de las emisiones de CO_2 producidas a nivel global, para esto la aviación mundial se ha comprometido a reducir a cero el nivel de contaminación para el año 2050. Inicialmente la reducción de emisiones en medios de trasporte era una opción, actualmente se vuelve una necesidad y una obligación, de esta manera en la industria, la IATA ha realizado un *Roadmap* que propone plazo de tiempo para que todos los equipos GSE al año 2030 sean eléctricos o a combustión de cero emisiones (IATA).

Considerando lo anterior, llevar a cabo este cambio de equipos Push-Back para que sean eléctricos en aeropuertos, se debe considerar que debe haber una inversión necesaria para llevarla a cabo y que modelos de estos tractores sean los más necesarios para optimizar las operaciones en tierra de manera que cumplan con la demanda de tráfico aéreo actual y futuro.

Actualmente los aeropuertos de Chile solo cuentan con tractores a combustión interna mediante diésel, lo que también significa un costo para las operaciones en tierra debido al alza de precios de combustible en un 289% desde el 2016 hasta el 2026 (Energia Abierta). En base al aumento de precios puede generar altos costes de operación en el futuro.

Debido a estos precios en combustibles se busca analizar la factibilidad de uso de tractores eléctricos en términos de tiempo y económicos para su reemplazo parcial o en su totalidad en los aeropuertos de Chile.

A lo anterior se suma que los equipos de apoyo en tierra concentran una fracción relevante de la huella de carbono aeroportuaria: se estima que representan cerca del 15% de las emisiones totales de carbono de un aeropuerto y consumen alrededor del 13% de su energía y combustible (Bao, 2023). A diferencia de las emisiones producidas en vuelo, cuya reducción depende de tecnologías todavía en desarrollo, las emisiones de los equipos de tierra pueden eliminarse con tecnología comercialmente disponible en la actualidad.

Esta transición cuenta además con el respaldo de los propios fabricantes. Goldhofer, TLD y Mototok, siendo los principales proveedores de tractores de remolque a nivel mundial ya ofrecen versiones eléctricas de sus equipos, y varios de ellos participan en las iniciativas de descarbonización impulsadas por la IATA. La oferta tecnológica, por tanto, no constituye una restricción para llevar a cabo el reemplazo.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Evaluar la factibilidad económica y operacional del reemplazo de tractores Push-Back diésel por equipos eléctricos en el Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez, mediante un análisis comparativo de costo global en un horizonte de evaluación de diez años

1.2.2. Objetivos Específicos

- Cuantificar la inversión inicial requerida para el reemplazo de un tractor Push-Back, incluyendo el equipo puesto en Chile, la infraestructura de carga y los permisos de acceso al recinto aeroportuario, expresada en pesos chilenos al año 2026.
- Determinar y comparar el costo operacional anual de ambas tecnologías. Considerando consumo energético, mantenimiento y reemplazo del paquete de baterías estableciendo el diferencial porcentual entre ellas.
- Calcular el sobreprecio máximo admisible del tractor eléctrico respecto de su equivalente diésel, definido como el diferencial de precio de compra bajo el cual el reemplazo mantiene su conveniencia económica en un horizonte de diez años.

1.3. Metodología

Se debe inicialmente identificar los tractores que operan en el aeropuerto de Santiago como ejemplo y base del estudio, la cantidad que operan en este, puesto que se debe distinguir entre los modelos existentes para el uso para cada aeronave, ya que dependiendo del tamaño de este último depende el modelo de Push-Back a utilizar.

Luego se identificarán los Push-back eléctricos existentes en el mercado, para comparar la cantidad de modelos existentes en el aeropuerto, para implementarlos en su uso dentro de este.

Posteriormente se evaluará el coste operacional de cada tipo de modelo en base a los gastos de energía y combustible que consume cada tipo de tractor y compararlo en torno a la demanda de vuelos existentes en el aeropuerto.

Continuando con lo anterior de estimará el tiempo de operación de los tractores eléctricos comparándolos con el tiempo de operación de los actuales Push-Back de diésel del aeropuerto, junto con eso el tiempo de carga de cada equipo, para los eléctricos en función de reemplazo de la batería y el periodo de carga de esta, con el tiempo de los a combustible fósil.

Se elegirá un modelo de una marca en específico que tenga una versión diésel y eléctrico para comparar las operaciones.

Para el estudio se considerará el coste de los equipos al ser nuevos, ya que la adaptación a modelos desde combustión a eléctrico no es viable si el equipo ya cuenta con tiempo de operación. Idealmente se considera compra de equipos nuevos para llevar a cabo la comparación.

Finalmente se hará una comparación de los costes y tiempo de operación de los equipos para evaluar si el reemplazo de los tractores sea rentable a futuro, en base a la reducción de costes de combustibles y si puede igualar o superar a la capacidad temporal operacional de los Push-Back de combustión.

1.4. Alcance

El espacio definido para el desarrollo del estudio está enfocado en el Aeropuerto de Santiago Arturo Merino Benítez, debido a su alta frecuencia de vuelos y es el espacio donde más se desarrollan las empresas de *Ground-Handling* con el uso de tractores Push-Back. Además, se enfoca directamente a estas empresas que busquen renovar equipos y disminuir los costes de operacionales.

Se busca definir este espacio de estudio como base para que empresas que busquen también implementar equipos eléctricos en su base de operaciones fuera del terminal de estudio.

También a talleres mecánicos que quieran especializarse en el mantenimiento de estos equipos en el caso de que estas empresas de GSE no puedan realizar estos procedimientos, buscando tercerizar la compra de repuestos, equipamiento de mantención e infraestructura necesaria.

Finalmente se pretende fomentar el cambio a estos tractores para contribuir con los objetivos propuestos por la aviación mundial, y que sirva como base para que otros aeropuertos que tengan la intención de generar un cambio para la industria aeronáutica como para el medio ambiente.

El carácter del análisis sería de explicativo, proposicional y geográfico.

2. Capítulo II: Estado del Arte

2.1. Antecedentes

2.1.1. Origen y desarrollo

El origen de los Push-Back se remonta desde finales de 1940 e inicios de 1950, cuando la fabricación de aeronaves de trasporte militar debido a la segunda guerra mundial dejó una enorme cantidad de estos en tierra sin ser utilizados, de esta forma se transformaron y vendieron estos a civiles. Debido a un crecimiento exponencial de vuelos, surgió el mercado de empresas y productos destinados a GSE como parte de apoyo al crecimiento y demanda del transporte aéreo (Eagletugs, s.f.).



Imagen 1: Hanomag tipo R 455 ATK de 1952
Fuente: truckinfocus.com

En los años 60 y 70 cuando los aviones se empezaron a ser cada vez más grandes y empezaron a necesitar sistemas de apoyo más avanzados, surgió el término “Push-Back” como parte de un proceso necesario para guiar a la aeronave fuera de la puerta de embarque, donde se describió un hombre esperando sobre un tractor a que el embarque terminara (Safire, 2007).



Imagen 2: Magirus-Deutz del tipo "Orion 250" de 1960
Fuente: truckinfocus.com

Durante las primeras décadas de la aviación el remolque de aeronaves se resolvió con tractores agrícolas adaptados. Esta práctica se originó en la época del *barnstorming*, cuando los pilotos aterrizaban en campos privados y el propio agricultor prestaba su tractor para mover el avión, y explica que hasta hoy el vehículo de remolque aeronáutico conserve el nombre de «tractor» (Smith, 2013).

La transición hacia equipos diseñados específicamente para la aviación se produjo durante la década de 1950, cuando la firma francesa TracMa comenzó a fabricar tractores concebidos para el remolque de aeronaves en reemplazo de los modelos agrícolas entonces en uso; su nombre llegó a volverse sinónimo de tractor en los países francófonos. En 1960 la alemana Schopf amplió su línea de productos y desarrolló sus primeros tractores de remolque de aeronaves, aprovechando la experiencia acumulada en cargadores para la industria minera (Smith, 2013).

El siguiente salto tecnológico se produjo en la década de 1980, cuando TracMa y Air France introdujeron el primer tractor sin barra de tractado. Estos equipos fueron concebidos inicialmente para remolcar aeronaves con pasajeros a bordo desde el terminal hasta la cabecera de pista, con el objeto de reducir el consumo de combustible de las aerolíneas. En 1987 Goldhofer, tras décadas dedicadas a maquinaria pesada para la construcción y el transporte, incorporó su propio tractor sin barra al mercado de equipos de apoyo en tierra (Smith, 2013).

2.1.2. Características de los tractores

Para definir los tipos de Push-Back, existen dos tipos: tractor con barra de tractado (TWT) y tractor sin barra de tractado (TWL). El primero se caracteriza por ser un vehículo que necesita una barra de tractado que va anclada y fija al eje del morro del avión, el tractor en el otro extremo de la barra se conecta a un eje ubicado en la parte frontal del vehículo, este eje es de libre rotación de giro, para maniobrar el tren delantero del avión. El tractor TWL es por otro lado un equipo que tiene como función alzar el eje delantero del avión, de manera que el equipo se ajusta y fija al eje delantero y lo eleva, luego éste maniobra con más facilidad la rotación de giro de la aeronave y guiarlo. Ambos vehículos tienen la capacidad de remolcar y empujar el avión por y hacia calles de rodaje adyacentes a los estacionamientos de embarque del aeropuerto o dentro de la terminal misma para entre distintos puntos dentro de esta (One Air, s.f.).



Imagen 3: Goldhofer Phoenix E

Estos equipos tienen diversos modelos con diferentes capacidades de potencia desde los 55 kW con capacidad de remolque menor o igual a 40 toneladas (Goldhofer, s.f.), hasta los 298 kW de potencia con una carga máxima de remolque de 600 toneladas (Goldhofer, s.f.).



Imagen 4: Goldhofer Bison E 620

2.1.2.1. Modelos de referencia con barra de tiro: »BISON« 620 y Challenger 280

Dentro de la categoría de tractores con barra de tiro para aeronaves de fuselaje ancho, son pocos los fabricantes que ofrecen un mismo modelo en versión diésel y eléctrica. Entre ellos se encuentran Goldhofer, con el par »BISON« D 620 y E 620; TLD, con el TMX-350 y el TMX-350-E (TLD, s.f.); y Trepel, con el Challenger 280 y el Challenger 280e. De estos tres, solo Goldhofer y Trepel disponen de fichas técnicas que detallan la cadena de tracción, el almacenamiento de energía y el desempeño de ambas versiones, mientras que TLD publica únicamente una descripción general del equipo. Por esta razón, la comparación se limita a los dos primeros.



Imagen 5: Trepel Challenger 280

El Challenger 280, del fabricante alemán Trepel, está equipado con un motor diésel Deutz TCD 3.6 de 100 kW (134 HP), desarrolla una fuerza de tracción de 220 kN y admite aeronaves de hasta 300 toneladas, lo que le permite atender a los Boeing B787 y Airbus A350. Su versión eléctrica, el Challenger 280e, reemplaza el motor de combustión por dos motores eléctricos de tracción de 46 kW cada uno y un tercer motor de 11,5 kW para la dirección y los frenos, alimentados por dos baterías de plomo-ácido de 96 V y 875 Ah, equivalentes a cerca de 168 kWh nominales (Trepel, 2024). Este es, además, el equipo que se modela en el estudio sobre la provisión de servicios auxiliares a la red eléctrica mediante equipos de apoyo en tierra electrificados (Alruwaili, 2022). La Tabla 1 compara ambos pares.

Parámetro	**BISON D 620**	**BISON E 620**	**Challenger 280**	**Challenger 280e**
Fabricante	Goldhofer (Alemania)	Goldhofer (Alemania)	Trepel (Alemania)	Trepel (Alemania)
Configuración	Con barra de tiro (TWT)	Con barra de tiro (TWT)	Con barra de tiro (TWT)	Con barra de tiro (TWT)
Fuente de energía	Motor diésel DEUTZ TCD 4.1 L4	Batería de ion-litio de 400 V	Motor diésel Deutz TCD 3.6	2 baterías de plomo-ácido de 96 V / 875 Ah
Potencia instalada	115 kW	115 kW	100 kW	2 × 46 kW de tracción + 11,5 kW auxiliar
Fuerza de tracción	205 kN	205 kN	220 kN	210 kN
MTOW admisible	250 t	250 t	300 t	300 t
Almacenamiento de energía	Estanque, máx. 135 L	80 / 120 / 160 kWh	No informado	≈168 kWh nominales
Velocidad de desplazamiento	No informada	No informada	28 km/h	18 km/h
Transmisión	ZF powershift, 6 / 3 marchas	ZF powershift, 6 / 3 marchas	Powershift con convertidor, 5 / 3 marchas	Caja DANA de 2 marchas
Radio de giro	6.027 mm	6.027 mm	5.600 mm	5.600 mm
Peso de operación	24 / 28 t máx.	24 / 28 t máx.	24 / 28 t máx.	24 / 28 t máx.

Tabla 1: Comparación de los pares diésel-eléctrico »BISON« 620 y Challenger 280
Fuente: elaboración propia a partir de las fichas técnicas de Goldhofer AG y del catálogo de productos de Trepel Airport Equipment (2024).

La comparación explica por qué el estudio adopta el »BISON« 620 como equipo de referencia. De acuerdo con las fichas técnicas disponibles, las dos versiones del »BISON« declaran valores idénticos de potencia, fuerza de tracción, peso máximo de despegue admisible, peso de operación y radio de giro (Goldhofer, 2023), de modo que la única diferencia entre ellas es la fuente de

energía. En el Challenger, en cambio, el paso a la versión eléctrica modifica el desempeño del equipo: la fuerza de tracción disminuye de 220 a 210 kN (4,5%), la velocidad de desplazamiento baja de 28 a 18 km/h (36%) y la transmisión cambia de una caja powershift de cinco marchas a una de dos. Comparar sus costos significaría atribuir a la fuente de energía diferencias que también responden a desempeños distintos. A ello se suma que la batería de ion-litio del »BISON« E 620 corresponde a la tecnología sobre la cual se informan los precios de baterías empleados en el Capítulo III y tolera mejor las cargas parciales durante la jornada, mientras que la batería de plomo-ácido del Challenger 280e es menos tolerante a ese régimen y requiere mantención periódica.

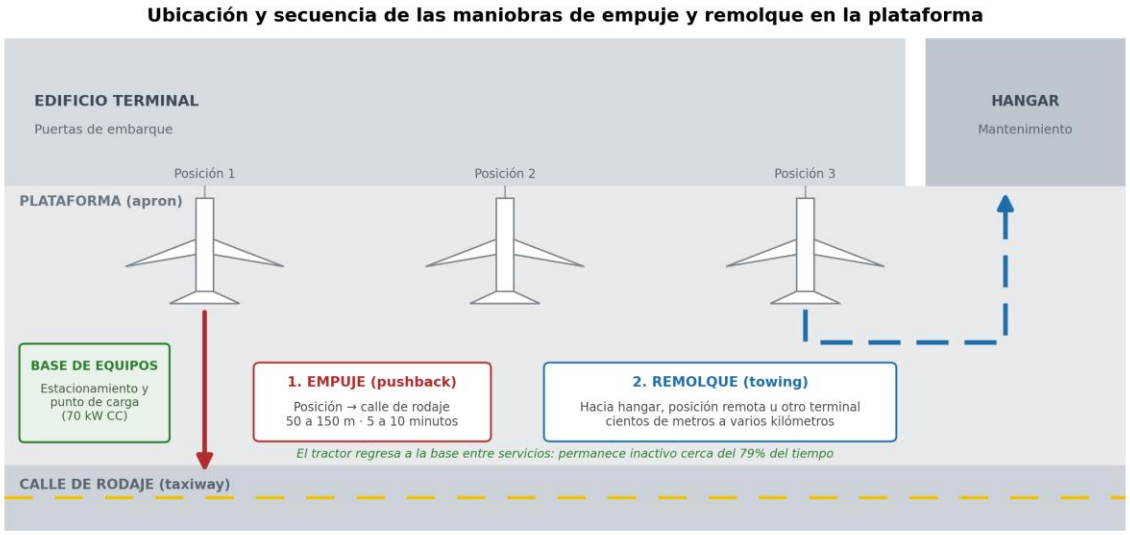
Con todo, el Challenger 280 ofrece una capacidad mayor, de 300 toneladas frente a las 250 del BISON 620, lo que le permite atender aeronaves como el Boeing B787-9 o el Airbus A350-900, cuyo peso máximo de despegue supera el límite del equipo de referencia. Esta diferencia no altera el método de evaluación, pero acota los resultados a la operación de aeronaves de hasta 250 toneladas, aspecto que debe considerarse al interpretar el análisis.

2.1.3. Operación: empuje y remolque de aeronaves

Establecidas las características constructivas de los equipos, corresponde describir la operación que realizan, puesto que de ella dependen tanto el régimen de trabajo que se estimará en el Capítulo III como las restricciones que condicionan la electrificación.

El empuje constituye por lo general la última operación del ciclo de atención en tierra de una aeronave. Una aeronave comercial no dispone de un sistema de retroceso utilizable en plataforma: si bien sus motores cuentan con inversores de empuje, su uso para retroceder no forma parte de la operación regular por el riesgo de ingestión de objetos extraños y de proyección de residuos sobre el equipamiento y el personal del terminal. En consecuencia, la aeronave requiere de un tractor que la desplace desde la posición de estacionamiento hasta la calle de rodaje, punto desde el cual continúa por sus propios medios (Zhou, 2025).

La maniobra se desarrolla íntegramente dentro de la plataforma, en el espacio comprendido entre la posición de estacionamiento y la calle de rodaje. El Esquema 1 representa esquemáticamente ese espacio y las dos operaciones que el equipo ejecuta en él.



Fuente: elaboración propia sobre la base de Zhou et al. (2025). Esquema conceptual, sin escala ni correspondencia con la configuración de un aeropuerto determinado.

Esquema 1: Ubicación y secuencia de las maniobras de empuje y remolque en la plataforma

Ilustración 1

La secuencia del empuje comprende cinco etapas. La primera es el acoplamiento: en los tractores con barra de tiro se ancla la barra al tren de nariz de la aeronave, mientras que en los equipos sin barra el tren delantero se alza y se asegura sobre la plataforma del tractor. La segunda es el establecimiento de comunicación entre el operador y la tripulación mediante intercomunicador, y la obtención de la autorización del control de tierra. La tercera es el retroceso propiamente tal, ejecutado a baja velocidad siguiendo la marcación de la plataforma, con un recorrido que se sitúa habitualmente entre cincuenta y ciento cincuenta metros. La cuarta, que en la mayoría de los casos se superpone a la anterior, es el arranque de los motores de la aeronave. La quinta es la desconexión: detención, retiro de la barra o descenso del tren, verificación visual y retirada del equipo. El conjunto demanda entre cinco y diez minutos.

El arranque de motores durante la maniobra no es un detalle menor para los efectos de este estudio. Las fichas técnicas del fabricante declaran expresamente que las capacidades de tracción publicadas corresponden a condiciones con los motores de la aeronave en funcionamiento durante el empuje, junto con un coeficiente de fricción de 0,57 sobre hormigón húmedo y una pendiente de plataforma de 1%. Los valores consignados en la Tabla 4 deben leerse, por tanto, bajo ese supuesto.

El empuje no agota, sin embargo, las funciones del equipo. La literatura distingue dos modos de servicio de remolque. El primero es el remolque convencional, que corresponde a la maniobra de empuje descrita: el tractor desplaza la aeronave desde la posición hasta una distancia segura y la

aeronave prosigue el rodaje con sus propios motores. El segundo es el remolque de rodaje, en el cual el tractor conduce la aeronave a lo largo de toda la calle de rodaje sin que los motores lleguen a encenderse, con la consiguiente reducción del consumo de combustible, del desgaste de frenos y del ruido (Zhou, 2025).

Dentro del recinto aeroportuario el equipo ejecuta además traslados que no se asocian a la salida de un vuelo: movimientos entre posiciones de contacto y posiciones remotas, ingreso y salida de hangares de mantenimiento y desplazamientos entre terminales. Estos recorridos son de un orden de magnitud superior al del empuje de cientos de metros a varios kilómetros y se ejecutan a mayor velocidad, de modo que imponen al motor una demanda sostenida en lugar del esfuerzo breve e intenso característico del empuje. Esta diferencia es la que fundamenta el rango de factores de carga que se adopta en el apartado 3.2.2.

Ambos tipos de tractor descritos en el apartado anterior se comportan de manera distinta frente a estas funciones. El tractor con barra de tiro ofrece mayor compatibilidad con distintos tipos de aeronave y menores costos de inversión y de mantenimiento, y resulta apropiado para desplazamientos de baja velocidad y corta distancia. El tractor sin barra, en cambio, permite velocidades de desplazamiento mayores y más seguras, lo que se traduce en una mayor eficiencia cuando el recorrido es extenso (Zhou, 2025).

La asignación de los equipos está sujeta a dos restricciones que conviene señalar. La primera es de compatibilidad: cada modelo de tractor se dimensiona para un rango determinado de aeronaves, y en el caso de los equipos con barra de tiro se requiere además una barra específica para cada tipo. Ello obliga a que un estudio de reemplazo fije previamente la clase de equipo que evalúa, decisión que se adopta en el apartado 2.2.1. La segunda es de programación: el servicio está sujeto a ventanas de tiempo estrictas, de modo que un tractor que llega antes de lo previsto debe esperar, y uno que no completa la maniobra dentro de la ventana asignada produce directamente un retraso del vuelo (Zhou, 2025). Esta restricción acota los momentos en que un equipo eléctrico puede ser recargado, punto que se retoma en el apartado 3.4.2.

Corresponde finalmente distinguir el objeto de este estudio de una línea de desarrollo próxima pero distinta. La electrificación del rodaje ha dado origen a sistemas embarcados instalados en el tren delantero de la aeronave y a tractores de rodaje específicos, entre los que se cuentan el Taxibot de Israel Aerospace Industries y el PHOENIX E del propio fabricante Goldhofer, este último en

operación en el aeropuerto de Frankfurt (Ahmadi, 2023; Akgunduz, 2023). Dichas alternativas persiguen reducir el consumo de combustible de la aeronave durante el rodaje y no el del equipo de tierra; la evidencia disponible indica que el remolque eléctrico externo es la opción de mayor reducción de consumo, aunque incrementa el tiempo de rodaje. La presente memoria evalúa el reemplazo del tractor de empuje por un equipo eléctrico equivalente, y no la sustitución del método de rodaje de la aeronave, que constituye un problema de naturaleza distinta.

De esta descripción se desprende la característica operacional que hace viable la electrificación del equipo. El tractor ejecuta trayectos cortos, a baja velocidad, íntegramente dentro de un recinto cerrado, y regresa entre servicios a una base de operaciones donde puede disponerse de infraestructura de carga. No enfrenta, por tanto, la restricción de autonomía que condiciona al vehículo eléctrico de carretera, sino una restricción distinta: la de disponer de ventanas de recarga compatibles con la programación de vuelos.

2.1.4. Electricidad en el transporte

Hace diez años, el transporte eléctrico era una tecnología experimental. Hoy la realidad es muy distinta, ya que es el motor eléctrico está transformando a toda la industria automotriz. La información de la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2025) son contundentes al considerar que, en 2020 apenas el 4% de las ventas globales correspondía a vehículos eléctricos y para 2025, ese valor subió al 25%, con más de 17 millones de unidades vendidas solo durante el 2024. Y si las proyecciones se cumplen, la cuota de mercado superará cómodamente el 40% para el 2030.

El dato más relevante no está en los autos ligeros, sino en los de maquinaria pesada. Las ventas globales de camiones eléctricos llevan cinco años consecutivos aumentando exponencialmente, rompiendo por primera vez la barrera de las 400.000 unidades anuales (cerca de un 9% del total de camiones). Esto demuestra que la electrificación ya se está imponiendo en las industrias que necesitan vehículos pesados, un sector industrial donde evaluar con precisión la autonomía por horas y los costos reales de operación diaria empieza a resultar mucho más competitivo que seguir utilizando combustibles fósiles tradicionales (IEA, 2025).

Aterrizando este panorama a nivel local, Chile no se ha quedado atrás; de hecho, se ha consolidado como un claro referente en electromovilidad para la región. La Estrategia Nacional de Electromovilidad (Ministerio de Energía, 2021) fijó metas muy exigentes, estableciendo que el 100% de los vehículos livianos vendidos para 2035 sean cero emisiones, y apunta a un transporte

público totalmente eléctrico para 2050. El impacto de esta política no es solo teórico, puesto que el sistema RED en Santiago, donde casi el 45% de la flota ya es eléctrica, marcando un hito a nivel latinoamericano para el transporte público (Ministerio de Energía, 2017).

Esta misma lógica de eficiencia operativa se está trasladando rápidamente desde las calles hacia las calles de rodaje en aeropuertos. Para las empresas de *ground handling*, adoptar equipos de soporte terrestre (GSE) eléctricos dejó de ser un idea. Al electrificar la maquinaria, se elimina de golpe la combustión interna en la losa y reduce drásticamente la fatiga por contaminación acústica que sufre el personal en la plataforma (IATA, s.f.).

Con los compromisos de descarbonización siendo cada vez altos, los aeropuertos están empezando a renovando sus flotas a un ritmo más alto, proyectando un crecimiento anual para el mercado de GSE eléctrico de entre un 6% y un 10% (ICF, 2024). Bajo este escenario, la decisión de incorporar tractores *Push-Back* eléctricos va mucho más allá de seguir una tendencia; es una modernización técnica obligatoria. El verdadero desafío para los operadores ya no es justificar la compra, sino dominar los nuevos esquemas de costos operativos y gestionar con precisión la autonomía por horas de estos equipos.

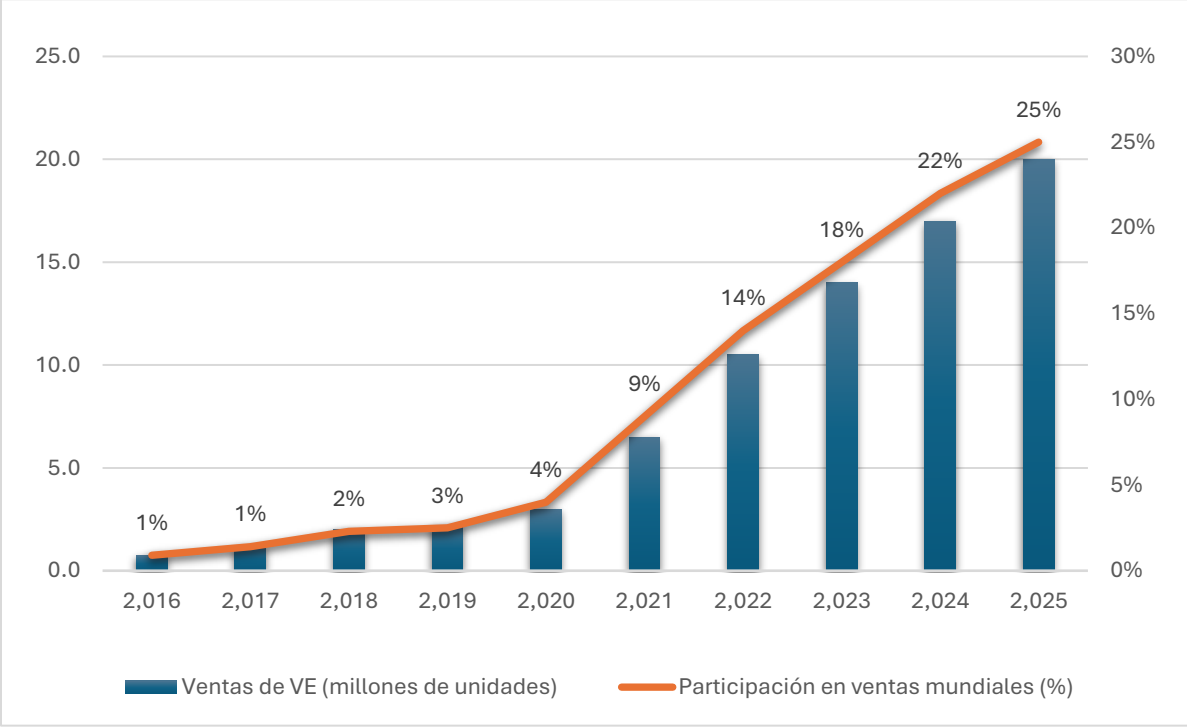


Gráfico 1: Evolución de las ventas globales del transporte eléctrico.
Fuente: elaboración propia a partir de IEA, Global EV Outlook 2025.

2.1.5. Evolución del transporte eléctrico

El origen del trasporte eléctrico viene desde primera mitad del siglo XIX. Alrededor de la década de 1830, el inventor escocés Robert Anderson construyó uno de los primeros carruajes con un motor eléctrico, y en 1835 el profesor neerlandés Sibrandus Stratingh desarrolló un pequeño vehículo eléctrico a escala. No obstante, el verdadero inicio de esta tecnología llegó de la mano del transporte público: en 1881 Werner von Siemens inauguró en Berlín el primer tranvía eléctrico, y en 1882 empezó a circular el primer trolebús de la historia, alimentado mediante una catenaria aérea (Curiosfera, s.f.).

Hacia finales del siglo XIX y comienzos del XX, los vehículos eléctricos presentaron un auge. En la década de 1890, el químico William Morrison construyó en Des Moines, Estados Unidos, un carruaje eléctrico con capacidad para seis pasajeros y una velocidad máxima de 22 kilómetros por hora, vehículo que aumentó el interés en la electricidad en el transporte. Hacia 1900 los automóviles eléctricos alcanzaron su punto más alto, representando cerca de un tercio de todos los vehículos en circulación en ese país (AAA, 2025), en un mercado donde las tecnologías a vapor, a gasolina y eléctrica competían por imponerse (US Department of Energy, 2014)

Este interés en el trasporte eléctrico se explica por las limitaciones tecnológicas de la competencia. Los vehículos a vapor necesitaban tiempos de encendido prolongados, que en climas fríos podían alcanzar los 45 minutos y debían reabastecerse de agua, lo que volvía muy complejo su uso en general y restringía su autonomía. Los vehículos a combustión interna, por su parte, exigían un considerable esfuerzo manual: el cambio de marchas era complicado y el encendido se realizaba mediante manivela, además de ser ruidosos y emitir gases de efecto invernadero. Los eléctricos no presentaban ninguno de estas características mencionadas, resultando ser silenciosos, fáciles de conducir y libres de emisiones (US Department of Energy, 2014) (Periscope, 2023).

Mientras en el segmento de vehículos particulares el motor de combustión tomo terreno rápidamente, en el ámbito de los vehículos comerciales ocurrió lo contrario: hacia 1905 más de la mitad de los vehículos comerciales en circulación en Estados Unidos eran eléctricos (AAA, 2025), y hasta 1920 se produjeron una gran cantidad de automóviles y camiones eléctricos. La razón de esta persistencia es operacional. La energía eléctrica se adaptaba especialmente bien al régimen de detenciones y arranques frecuentes propio de los vehículos comerciales y de servicio urbano; los

camiones de reparto operaban con horarios regulares que facilitaban la programación de la recarga, y sus rutas planificadas minimizaban el riesgo de agotar la batería fuera del centro de operaciones (Periscope, 2023).

La tendencia a la baja posterior fue tan intenso como su auge. La producción en serie del Ford Modelo T introducido en 1908 hizo que los vehículos a combustión interna resultaran mucho más accesible para el público, ya para 1912 un vehículo a gasolina costaba $650 dólares, mientras que un auto eléctrico se vendía en $1.750 dólares. Ese mismo año, la incorporación del motor eléctrico para el arranque desarrollado por Charles Kettering eliminó la manivela e igualó a la principal ventaja del encendido que tenían los eléctricos. Junto con lo anterior se sumaron el descubrimiento de grandes yacimientos de petróleo en Texas, que redujo los costos del combustible y produjo el aumento de las estaciones de servicio junto con el desarrollo de una red vial interurbana, en un contexto en que muy pocos habitantes fuera de las ciudades contaban con acceso a la electricidad. Como resultado, los vehículos eléctricos prácticamente desaparecieron hacia 1935, quedando relegados al transporte en tren y a aplicaciones industriales de nicho durante casi seis décadas (US Department of Energy, 2014).

Finalmente, el declive del transporte eléctrico en vehículos particulares se vio afectado por el aumento de mejora en la infraestructura de las carreteras en Estados Unidos, donde se abrió la oportunidad de poder realizar viajes más largos, entonces la combustión interna vio un auge debido a su autonomía. Junto con lo anterior, a principios del siglo XX el descubrimiento de yacimientos petrolíferos en Texas y Pensilvania permitieron la masificación de estaciones de servicio, aumentando la oferta de combustibles y disminuyendo drásticamente su precio permitiendo este ser más asequible al público, así aumentando la capacidad de los autos de poder recorrer largas distancias mediante las estaciones de servicio mediante el repostaje en carreteras (Periscope, 2023).

En los años 2000, se empezó a notar nuevamente el interés por el trasporte eléctrico, impulsado por el desarrollo de las baterías de ion-litio, la constante preocupación ambiental y los avances tecnológicos que permitieron aumentar la autonomía y reducir los costos de uso de los autos. Este nuevo crecimiento, descrito en el punto anterior, ha transformado no solo a los vehículos particulares, sino también al transporte público y a la maquinaria industrial y aeroportuaria.

La intensidad de este aumento se aprecia al observar la circulación mundial de autos eléctricos. Mientras que en 2015 apenas superaba el millón de unidades, hacia finales de 2024 la cantidad

mundial de autos eléctricos alcanzó cerca de 58 millones de vehículos, equivalente a aproximadamente un 4% de autos de pasajeros y más del triple de lo registrado en 2021 (IEA, 2025). El Gráfico 2 muestra el comportamiento del crecimiento exponencial de esta última década.

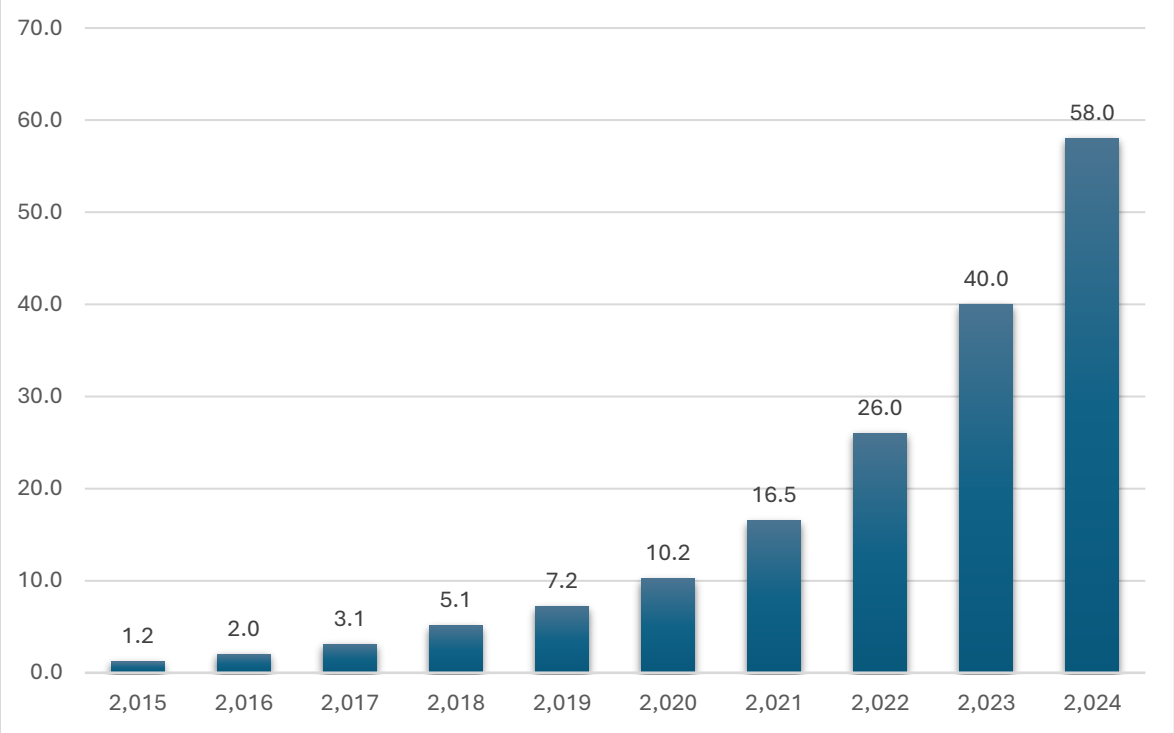


Gráfico 2: Parque circulante mundial de automóviles eléctricos (2015–2024)
Fuente: elaboración propia a partir de IEA, Global EV Outlook 2025.

Este crecimiento en unidades ha tenido una relación económica directa. El valor del mercado mundial de vehículos eléctricos pasó desde aproximadamente 163 mil millones de dólares en 2020 hasta cerca de 393 mil millones en 2025, con proyecciones que superan los 820 mil millones hacia 2030 (Allied Market Research, 2022); (Narayan, 2026). Esta dinámica en el ámbito comercial es relevante, ya que la expansión de la industria ha impulsado economías de escala en la fabricación de baterías y componentes, reduciendo progresivamente los costos de adquisición de maquinaria eléctrica, incluidos los equipos de soporte en tierra.

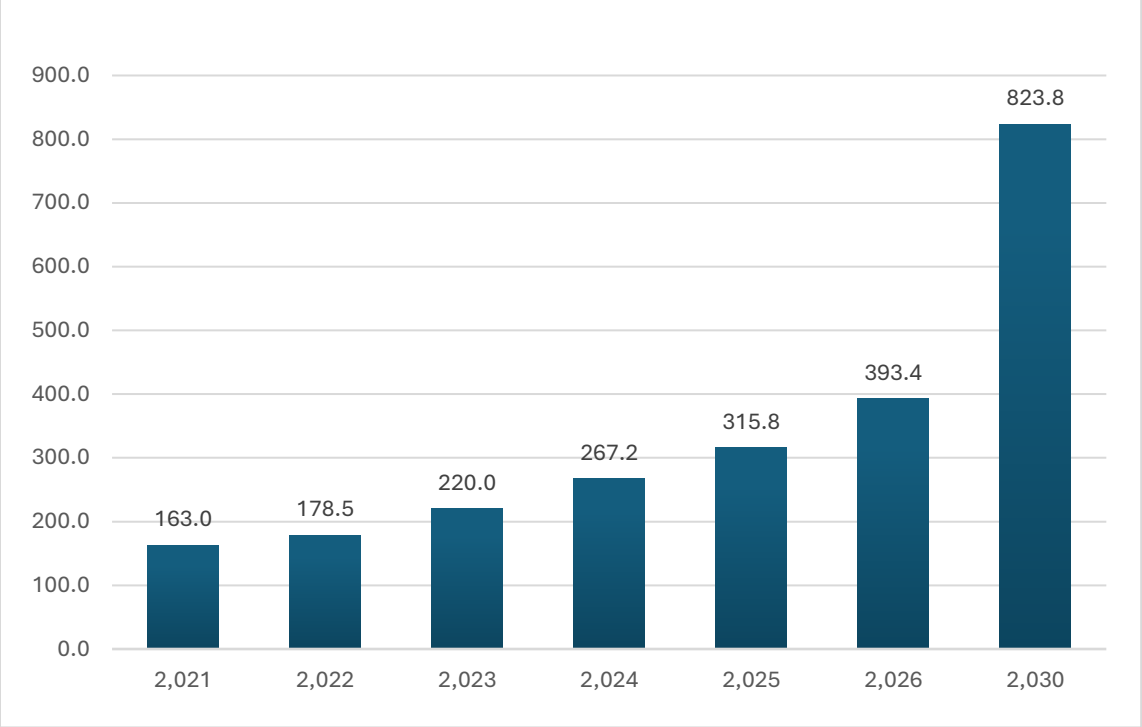


Gráfico 3: Evolución del valor del mercado mundial de vehículos eléctricos
Fuente: elaboración propia a partir de Allied Market Research y Precedence Research. La cifra de 2030 es proyectada.

En Chile, esta tendencia mundial se ha visto crecer durante los últimos años. Según las cifras de la Asociación Nacional Automotriz de Chile (ANAC), la venta de automóviles 100% eléctricos pasó desde apenas 282 unidades en 2021 hasta 4.507 unidades en 2024 que representa un incremento de 183,8% respecto al año anterior y alcanzó las 5.512 unidades durante 2025 (ANAC, 2025). Si se considera la totalidad de vehículos eléctricos, es decir, aquellos de cero y bajas emisiones, las ventas crecieron desde 6.904 unidades en 2022 hasta 35.443 unidades en 2025, lo que representa un alza de 85,6% respecto de 2024 y una participación de 11,4% del mercado de vehículos livianos y medianos (ANAC, 2025).

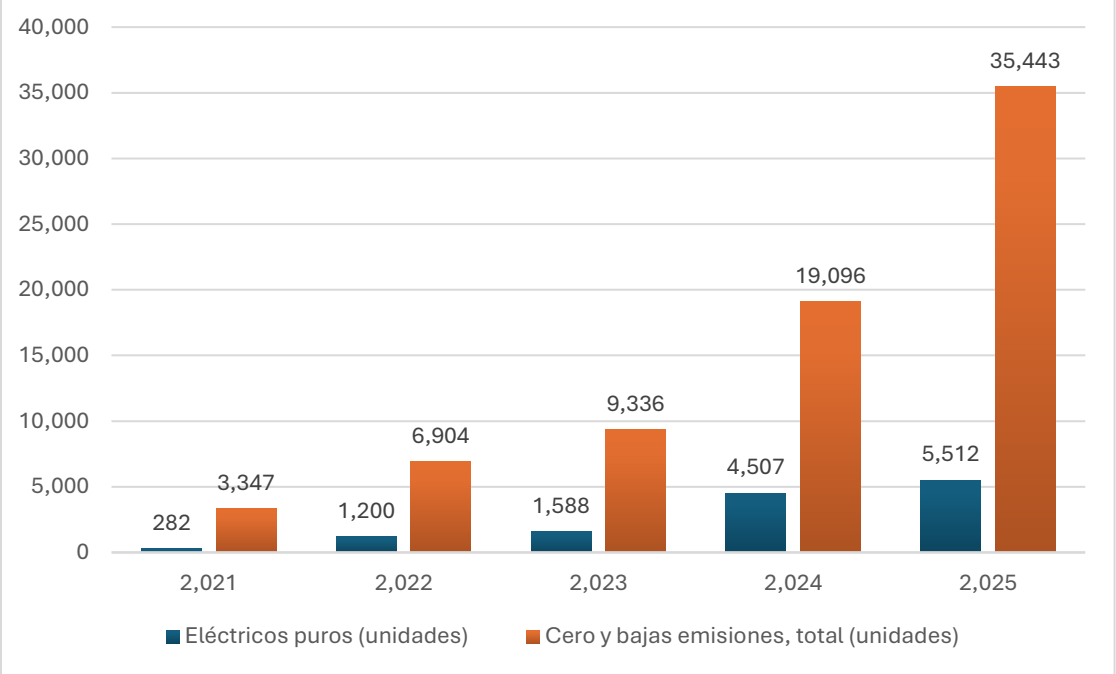


Gráfico 4: Evolución de la venta de vehículos eléctricos y electrificados en Chile (2021–2025)
Fuente: elaboración propia a partir de la Asociación Nacional Automotriz de Chile (ANAC). La cifra de 2022 de eléctricos puros es estimada.

Un aspecto importante es el crecimiento que se ha visto por el alza en el precio de los combustibles fósiles. Al cierre de abril de 2026, las ventas acumuladas de vehículos de cero y bajas emisiones registraron un incremento de 109,6% respecto al mismo período del año anterior, dando una totalidad de 18.802 unidades, mientras que solo los eléctricos acumularon 3.298 unidades con un alza de 96,7% (ANAC, 2026). Este comportamiento muestra que la variable es económica y no únicamente la ambiental y constituye hoy un factor importante en la decisión de empezar a enfocarse hacia tecnologías renovables.

En cuanto a la infraestructura de carga de autos eléctricos, entre julio de 2024 y julio de 2025 la potencia instalada en carga pública en Chile se duplicó, pasando de 28,8 MW a 59,2 MW, superando los 1.200 puntos de carga públicos a nivel nacional (ANAC, 2024); (ANAC, 2025). Sin embargo, la concentración de esta infraestructura en la Región Metropolitana sigue siendo uno de los principales desafíos para la masificación de la electromovilidad.

En cuanto de los equipos de soporte en tierra (GSE), esta evolución ha seguido una trayectoria parecida. Los primeros prototipos combinaron sistemas híbridos-eléctricos como el tractor híbrido probado en la Estación Aeronaval de North Island para luego pasar a equipos completamente eléctricos con baterías de ion-litio. La adopción ha aumentado en la última década: entre 2016 y 2018, Swissport incrementó su flota de GSE eléctricos. Por otro lado, la industria del soporte en

tierra lleva desde 1925 hasta 2.420 vehículos, incluyendo tractores Push-Back a batería (Aviaton Pros, 2022). Fabricantes como Eagle Tugs y Textron GSE han implementado tractores eléctricos de cero emisiones que hoy compiten directamente con el diésel, consolidando la electrificación como la tendencia dominante en la evolución del transporte y apoyo en tierra.

2.1.6. Uso de tractores eléctricos en el mundo

La electrificación de los equipos de apoyo en tierra ha pasado de las pruebas piloto a la operación regular en distintas regiones del mundo. En Europa, Swissport, empresa que opera la mayor flota de equipos de apoyo en tierra del mundo, ya tiene el 25% de sus equipos electrificados, con niveles de entre 43% y 59% en los aeropuertos suizos de Zúrich, Basilea y Ginebra, y renueva su flota en 28 países con tractores de equipaje, cintas transportadoras y tractores Push-Back eléctricos (Westerheide, 2025). En Asia, Singapur estableció que desde 2025 los nuevos vehículos livianos y tractores de plataforma del aeropuerto de Changi deben ser eléctricos, con la meta de que todos los vehículos de plataforma operen con energía limpia al 2040 (Lee, 2023). En Estados Unidos, el programa federal VALE financia la adquisición de eGSE y de su infraestructura de carga en los aeropuertos comerciales (Airports Council International, 2024). En Latinoamérica la adopción es más reciente y se concentra en equipos livianos, con avances en México, Costa Rica, Trinidad y Tobago, Aruba y Chile, aunque limitada por la falta de infraestructura de carga en muchos aeropuertos de la región (Pierobon, 2024).

Como ejemplo del uso de estos equipos se escogieron dos casos: el Aeropuerto de Ámsterdam-Schiphol, en los Países Bajos, donde varias empresas de handling comparten la meta de una operación terrestre sin emisiones al 2030 (Royal Schiphol Group, 2023) y las principales ya superan el 65% de su flota electrificada (KLM, 2024) (dnata, 2024); y el Aeropuerto Internacional de Salt Lake City, en Estados Unidos, donde Delta Air Lines realiza su propio handling y ha electrificado casi por completo los equipos necesarios para atender una aeronave, incluidos los tractores de remolque (Delta Air Lines, 2023). La Tabla 2 resume sus características generales.

Aspecto	Ámsterdam-Schiphol (AMS), Países Bajos	Salt Lake City (SLC), Estados Unidos
Flota eléctrica	≈ 40% de los equipos de handling del aeropuerto (2023)	Cercana al 100% de la flota principal de Delta (2023)
Empresas operadoras	KLM Ground Services (> 70% eléctrico, 2024); dnata (> 65%, 2024); Swissport (100% desde 2025); Aviapartner	Delta Air Lines (handling propio)
Equipos eléctricos en uso	Tractores de equipaje y de equipos, unidades de energía en tierra (e-GPU) y aire preacondicionado	Tractores de equipaje, cintas transportadoras y tractores de remolque de aeronaves
Meta	Operación terrestre sin emisiones al 2030	100% de los equipos de sus hubs electrificados al 2035

Tabla 2: Uso de equipos de apoyo en tierra eléctricos en Ámsterdam-Schiphol y Salt Lake City
Fuente: elaboración propia a partir de Royal Schiphol Group (2023), KLM (2024), dnata (2024), Westerheide (2025) y Delta Air Lines (2023).

2.1.7. Regulaciones y normativas

El precio final de los combustibles en Chile está determinado por una estructura tributaria que está relacionada directamente en las ventas a vehículos de combustión, como los tractores Push-Back diésel. Sobre el valor base del combustible se aplican dos gravámenes principales: el Impuesto al Valor Agregado (IVA), con una tasa del 19%, y el Impuesto Específico a los Combustibles establecido por la Ley N° 18.502 (Servicio de Impuestos Internos, 2007). Este último, definido en el Artículo 6° de dicha ley, fija un componente base de 1,5 UTM por metro cúbico para el petróleo diésel y de 6 UTM por metro cúbico para la gasolina de todos los octanajes (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2013).

A este componente base se suma o resta un componente variable, regulado por la Ley N° 20.493, que da origen al Mecanismo de Estabilización de Precios de los Combustibles (MEPCO). Creado mediante la Ley N° 20.765 de 2014, el MEPCO busca amortiguar las fluctuaciones bruscas del precio internacional del petróleo mediante ajustes semanales a los impuestos específicos, evitando que la volatilidad del mercado se traspase íntegramente al consumidor (Comisión Nacional de Energía, s.f.).

Sin embargo, durante 2026 el mecanismo fue modificado, ampliando de dos a cuatro semanas el período de cálculo del precio de paridad de importación. Esta neutralización parcial del MEPCO, sumada a las presiones internacionales sobre el precio del crudo, se tradujo en alzas históricas en el valor de los combustibles (Carrizo, 2026). Como resultado, el precio del petróleo diésel en Chile

pasó desde aproximadamente $442 por litro en 2016 hasta llegar a los $1.400 y sobrepasar ese valor por litro en 2026, lo que representa un incremento cercano al 190% en diez años (CNE / Energía Abierta). Esta tendencia al alza constituye uno de los principales factores que justifican la evaluación de alternativas eléctricas para los equipos de GSE, cuyo costo energético resulta menos expuesto a la alta variabilidad del mercado de hidrocarburos.

Componente	**Base legal**	**Valor / Tasa**
Impuesto Específico (componente base)	Art. 6°, Ley N° 18.502	1,5 UTM / m³
Componente variable (MEPCO)	Ley N° 20.493 y N° 20.765	Variable semanal (±)
IVA	D.L. N° 825	19%

Tabla 3: Estructura tributaria del petróleo diésel en Chile

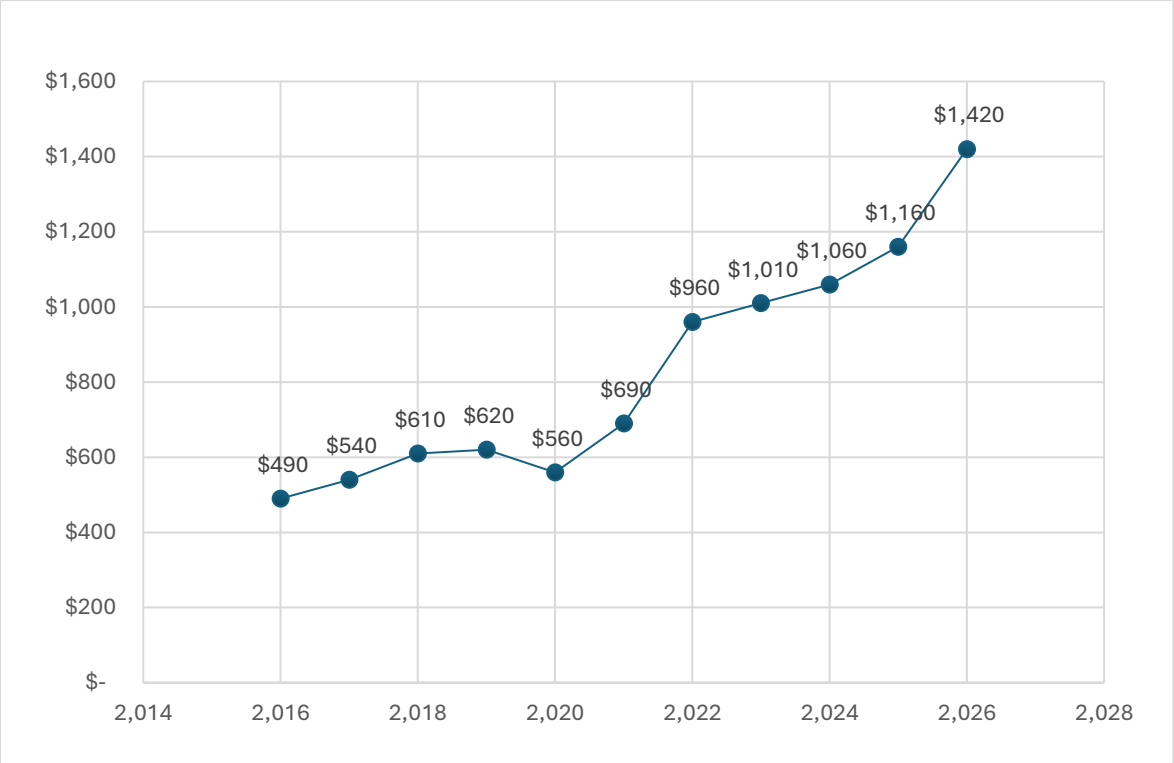


Gráfico 5: Evolución del precio del petróleo diésel en Chile (2016–2026)
Fuente: CNE / Energía Abierta. VALORES REFERENCIALES

2.1.8. Situación Ambiental

La industria aeronáutica se encuentra bajo una presión por reducir su huella de carbono. Durante 2024, las aerolíneas emitieron un total bruto de 942 millones de toneladas de CO_2 a nivel mundial, de las cuales aproximadamente un 1% fueron mitigadas mediante compensaciones o el uso de combustible de aviación sostenible (SAF), resultando en emisiones netas cercanas a 933 millones de toneladas (IATA, 2024). Esta cifra representa un aumento respecto de los 882 millones de toneladas registrados en 2023 y pese a las mejoras en eficiencia por pasajero-kilómetro, el crecimiento del tráfico aéreo continúa incrementando las emisiones totales del sector.

Aproximadamente, la aviación es responsable de un 2,5% de las emisiones globales de CO_2 asociadas a la energía, proporción que asciende al rango de 2% a 3% al considerar el conjunto de la actividad aeronáutica (ATAG, 2024). Si la aviación fuese un país, se ubicaría entre los diez mayores emisores del mundo. Frente a este escenario, la industria adoptó en 2021 el compromiso Fly Net Zero, mediante el cual las aerolíneas agrupadas en la IATA se obligan a alcanzar emisiones netas cero de CO_2 al año 2050, meta ratificada por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) en 2022 para los vuelos internacionales.

El Gráfico 6 permite observar la trayectoria de las emisiones del sector durante los últimos años, incluida la abrupta caída provocada por la pandemia de COVID-19 en 2020 y la posterior recuperación hasta superar nuevamente los niveles previos a la crisis sanitaria.

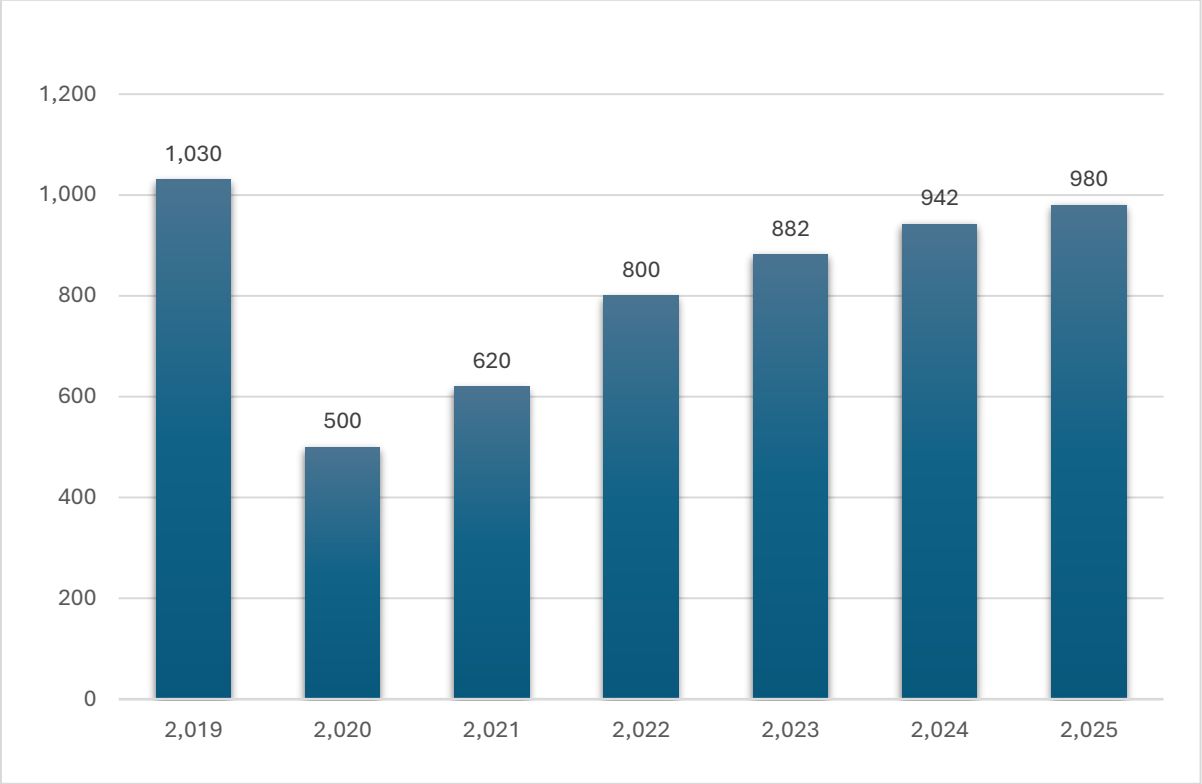


Gráfico 6: Emisiones globales de CO_2 de la aviación comercial (2019–2025)
Fuente: elaboración propia a partir de IATA (2025) y ATAG (2025).

Los equipos de soporte en tierra constituyen una fuente de emisiones acotada pero significativa y, sobre todo, altamente abordable. Se estima que los GSE son responsables de aproximadamente un 15% de las emisiones totales de carbono de un aeropuerto y consumen cerca del 13% del total de energía y combustible aeroportuario, incidiendo directamente en el Alcance 1 de la huella de carbono de los operadores (Zhang, 2026). A ello se suma que, en los aeropuertos de Estados Unidos, los GSE llegaron a representar el 13% de las emisiones de NOx (Timmermans, 2025). A diferencia de las emisiones producidas en vuelo, cuya reducción depende de tecnologías aún en desarrollo, como el SAF o la propulsión por hidrógeno, las emisiones de los equipos en tierra pueden eliminarse con tecnología ya disponible y comercialmente madura, lo que convierte a la electrificación de la flota de GSE en una de las medidas de descarbonización más costo-efectivas del sector.

La evidencia disponible respalda esta afirmación. Según la IATA, los equipos eléctricos generan entre un 35% y un 52% menos de emisiones de CO_2 por operación de atención a la aeronave que sus equivalentes de combustión interna, además de reducir la contaminación acústica en plataforma entre 5,5 y 8,3 dB(A) (IATA, s.f.). Casos concretos confirman estas cifras. El aeropuerto de Singapur Changi ha evitado 627 toneladas de CO_2 mediante la incorporación de 80 tractores de

equipaje eléctricos, apoyados en 26 puntos de carga de uso común, y proyecta convertir la mayor parte de su flota diésel al año 2030. Por su parte, el aeropuerto de Ámsterdam Schiphol ha alcanzado reducciones de hasta 90% en las emisiones de CO_2 mediante la incorporación de unidades de potencia terrestre eléctricas (Layan, 2020; AMS Schiphol, 2019). En la misma línea, el Aeropuerto Internacional de Seattle-Tacoma reporta un ahorro aproximado de 10.000 toneladas de gases de efecto invernadero y de 2,8 millones de dólares en combustible al año producto de la electrificación de sus equipos de apoyo en tierra (Layan, 2020).

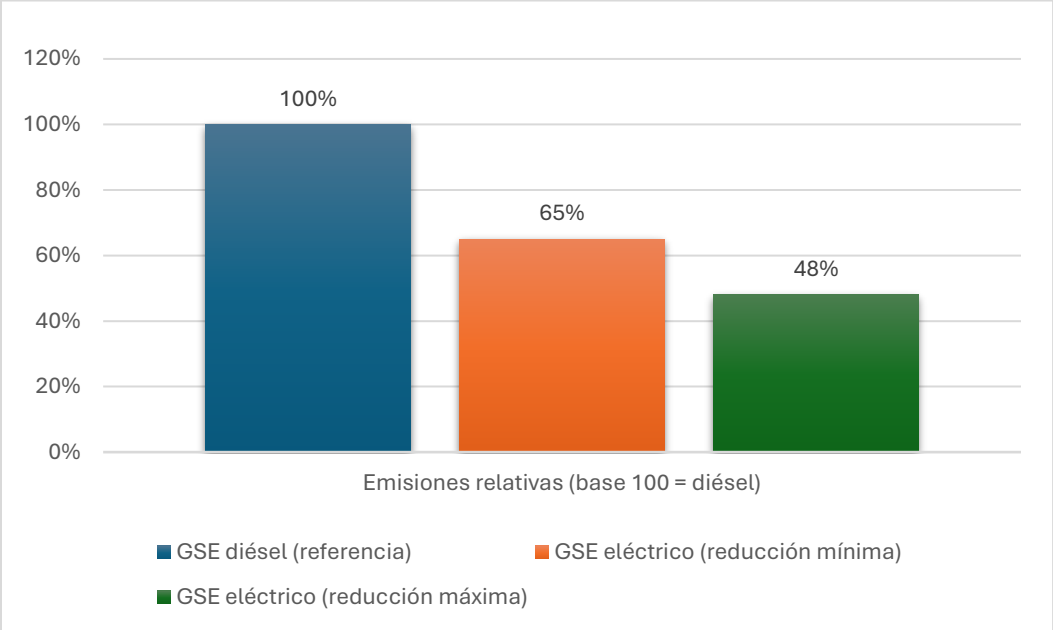


Gráfico 7: Emisiones comparadas de CO_2 entre GSE diésel y GSE eléctrico
Fuente: elaboración propia a partir de IATA, Electric GSE (s.f.).

Cabe señalar que la magnitud efectiva de esta reducción depende de la matriz energética del país donde opere el equipo, ya que la electricidad utilizada para la recarga puede provenir de fuentes fósiles. En el caso chileno, este factor resulta favorable: la matriz eléctrica nacional ha experimentado una acelerada incorporación de energías renovables, lo que incrementa el beneficio ambiental neto de electrificar los equipos de tierra respecto de los promedios internacionales.

Finalmente, debe considerarse que el impacto ambiental de los equipos diésel no se limita al CO_2. La combustión de petróleo diésel genera además óxidos de nitrógeno (NOx), material particulado (MP) e hidrocarburos no quemados, contaminantes locales que afectan directamente la calidad del aire en plataforma y, por consiguiente, la salud ocupacional del personal de tierra que se desempeña en las inmediaciones de estos equipos. La eliminación de estas emisiones en el punto de uso constituye un beneficio adicional de la electrificación que trasciende el objetivo climático global.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Descripción de Equipos

Como se especifica en el punto anterior, existen dos tipos de equipos, los tractores con barra y sin barra de tractado. Para el desarrollo del estudio, se basará en diferentes equipos y sus respectivas especificaciones, para luego comparar entre los modelos de combustión y eléctricos y proyectar sus costes operacionales y tiempos de operación y de recarga.

Para especificar sus capacidades se tomarán como referencia los tractores de la marca alemana Goldhofer, específicamente los modelos »BISON« D 620 y »BISON« E 620. La elección de este par responde a dos criterios. El primero es que esta familia de modelos se estructura como una plataforma modular en la que el cliente puede optar entre una cadena de tracción diésel o una eléctrica manteniendo el resto de la arquitectura del vehículo (Goldhofer, s.f.); al tratarse del mismo modelo, con idéntico chasis, transmisión, ejes y geometría, la única variable que cambia entre ambas versiones es la fuente de energía, lo que permite aislar el efecto de la tecnología sobre los costos y evitar que las diferencias de diseño entre marcas distintas contaminen la comparación. El segundo es la clase de capacidad: con un peso máximo de despegue admisible de 250 toneladas, el »BISON« 620 corresponde a la categoría de aeronaves de fuselaje ancho, que es precisamente la clase para la cual la literatura especializada documenta valores de adquisición, según se desarrolla en el apartado 2.2.3.

El BISON D 620 está equipado con un motor diésel DEUTZ TCD 4.1 L4 de cuatro cilindros y 115 kW de potencia, con un estanque de combustible de hasta 135 litros y homologación bajo las normas de emisiones EU Stage IIIA o V, y US EPA Tier 3 o Tier 4F. Por su parte, el BISON E 620 incorpora un accionamiento eléctrico de 115 kW y 609 Nm alimentado por una batería de ion-litio de 400 voltios, disponible en configuraciones de 80, 120 o 160 kWh de capacidad instalada, con un cargador integrado de corriente continua de 70 kW y la opción de un sistema de carga en corriente alterna de 22 kW (Goldhofer, 2023).

Ambas versiones comparten una fuerza de tracción instalada de 205 kN, la misma transmisión automática ZF de seis marchas hacia adelante y tres hacia atrás con convertidor de par integrado, ejes directrices motrices con reductores planetarios en los cubos y un radio de giro de 6.027mm. Esta equivalencia mecánica es precisamente lo que valida la comparación: el desempeño de

tracción, que constituye la función crítica de un tractor de remolque, resulta idéntico en ambas configuraciones. La Tabla 4 resume las especificaciones técnicas de ambos equipos.

Cabe precisar dos aspectos respecto de los valores consignados. En primer lugar, las capacidades declaradas por el fabricante corresponden a condiciones normalizadas de operación —hormigón húmedo con coeficiente de fricción de 0,57, pendiente de plataforma de 1% y motores de la aeronave en funcionamiento durante el Push-Back—, por lo que deben recalcularse si las condiciones locales difieren. En segundo lugar, y a diferencia de otros pares de la misma familia, las fichas técnicas del D 620 y del E 620 declaran valores idénticos de peso máximo de despegue admisible, fuerza de tracción instalada, peso de operación y radio de giro. Esta coincidencia refuerza la validez de la comparación, ya que confirma que ambas versiones corresponden efectivamente a la misma máquina y no a configuraciones de desempeño distinto.

Parámetro	**»BISON« D 620 (diésel)**	**»BISON« E 620 (eléctrico)**
Configuración	Tractor con barra de tiro (TWT)	Tractor con barra de tiro (TWT)
Fuente de energía	Motor diésel DEUTZ TCD 4.1 L4	Batería de ion-litio de 400 V
Potencia instalada	115 kW	115 kW / 609 Nm
Fuerza de tracción instalada	205 kN	205 kN
MTOW admisible	250 t	250 t
Almacenamiento de energía	Estanque de combustible, máx. 135 L	80 / 120 / 160 kWh según configuración
Reabastecimiento	Carga de combustible (minutos)	Cargador integrado DC de 70 kW; AC de 22 kW opcional
Transmisión	ZF automática full-power-shift, 6 marchas adelante / 3 atrás	ZF automática full-power-shift, 6 marchas adelante / 3 atrás
Radio de giro	6.027 mm	6.027 mm
Dirección	Delantera estándar; cuatro ruedas y cangrejo opcionales	Delantera estándar; cuatro ruedas y cangrejo opcionales
Sistema de frenos	Hidráulico de dos circuitos	Hidráulico de dos circuitos
Peso de operación	24 / 28 t máx.	24 / 28 t máx.
Normativa de emisiones	EU Stage IIIA o V; US EPA Tier 3 o Tier 4F	No aplica
Emisiones directas	CO_2, NOx y material particulado	Cero emisiones en el punto de uso

Tabla 4: Especificaciones técnicas comparadas »BISON« D 620 y BISON E 620
Fuente: elaboración propia a partir de las fichas técnicas de Goldhofer AG.

2.2.2. Autos Eléctricos

Para ajustar el precio de los tractores en sus dos variantes se va a considerar los precios de autos de un mismo modelo que posean ambas variantes, por lo que el mercado automotriz constituye la referencia más útil disponible para dimensionar el diferencial de costo entre una tecnología de combustión y su equivalente eléctrica.

A diferencia de los equipos de apoyo en tierra, cuyos precios no son públicos, la industria automotriz publica precios de lista, especificaciones de autonomía y rendimientos energéticos, y en algunos casos ofrece un mismo modelo en ambas variantes de propulsión.

Para esto, se busca identificar la relación de precios de las variantes de combustión interna y eléctrica para establecer una proporción que permita identificar la brecha entre los modelos, entonces lograr una aproximación de diferencia de precios para los tractores Push-Back.

El desarrollo de estos vehículos durante la última década ha estado determinado por la evolución de la batería. Los primeros modelos masivos ofrecían autonomías cercanas a los 150 kilómetros y capacidades inferiores a 25 kWh, mientras que los modelos actualmente disponibles en el mercado chileno superan los 300 kilómetros de autonomía con baterías de entre 40 y 65 kWh. Junto con el aumento de capacidad, la potencia de carga ha crecido de manera sostenida, reduciendo los tiempos de reposición de energía, y el consumo específico se ha estabilizado en torno a los 13 kWh por cada 100 kilómetros. Este es el mismo progreso técnico que hoy permite que un tractor de remolque como el »BISON« E 620 pueda ofrecerse con configuraciones de hasta 160 kWh y carga rápida en corriente continua.



Imagen 6: Hyundai KONA SX2 1.6T AT 4WD N-Line

De los modelos comercializados en Chile, se seleccionó el **Hyundai Kona** como caso de estudio. La elección responde a que es el único modelo que cumple simultáneamente las tres condiciones que exige la comparación: se ofrece bajo una misma marca y modelo en versión de combustión interna y 100% eléctrica; el fabricante publica precios de lista y fichas técnicas oficiales para ambas variantes; y dispone de datos de rendimiento declarados para las dos tecnologías. Restringir el análisis a un solo modelo evita que diferencias de marca, segmento o equipamiento contaminen el diferencial de precio, que es precisamente la variable que se busca aislar.



Imagen 7: Hyundai KONA SX2 EV GO LR

En el mercado chileno el Kona se comercializa en tres configuraciones: una versión de combustión interna y dos versiones eléctricas que se diferencian por la capacidad de su batería. La Tabla 5 presenta sus principales características.

Versión	**Motorización**	**Almacenamiento de energía**	**Potencia**	**Autonomía declarada**
KONA SX2 1.6T AT 4WD N-LINE	Combustión interna, 1.6 L turbo	Estanque de 47 litros	195 hp	526 km ciudad / 837 km carretera
KONA SX2 EV GO	Eléctrica, motor síncrono de imán permanente	Batería de ion-litio de 48,6 kWh (269 V)	99 kW / 133 hp	370 km (WLTP)
KONA SX2 EV GO LR	Eléctrica, motor síncrono de imán permanente	Batería de ion-litio de 64,8 kWh (358 V)	150 kW / 201 hp	505 km (WLTP)

Tabla 5: Versiones del Hyundai Kona disponibles en el mercado chileno

Ambas variantes comparten carrocería, dimensiones y plataforma, y se diferencian sustantivamente en el tren motriz. Esta situación es análoga a la que se observa entre el BISON D 620 y el BISON E 620, donde el chasis, la transmisión y la capacidad de tracción se mantienen constantes y solo cambia la fuente de energía. Por esta razón, el diferencial de precio observado entre las variantes

del Kona se emplea en el apartado siguiente como estimador del diferencial esperable entre ambas versiones del tractor.

2.2.3. Precios de autos con sus dos variantes

Ninguno de los fabricantes de tractores de remolque publica el precio de venta de sus equipos: tanto Goldhofer como TLD los comercializan exclusivamente bajo cotización, y los valores efectivamente pagados varían según el volumen de compra, la configuración solicitada y las condiciones negociadas por cada aeropuerto u operador. Esta ausencia de precios públicos constituye la principal restricción de información del presente estudio.

Para resolverla se emplean dos aproximaciones independientes. La primera recurre a valores de adquisición de equipos de apoyo en tierra documentados en la literatura especializada; la segunda, al mercado automotriz chileno, donde sí existen precios de lista públicos para modelos ofrecidos en ambas variantes de propulsión sobre una misma plataforma. En esta segunda aproximación se emplean dos referencias de distinta naturaleza: un automóvil de uso particular y un vehículo de trabajo de propulsión diésel. La coincidencia entre los resultados de ambas aproximaciones permite validar la estimación obtenida.

*Valores documentados para equipos de apoyo en tierra***.** Sari et al. (2022) reportan los montos de inversión de una empresa de servicios de rampa para siete tipos de equipos de apoyo en tierra, en sus versiones diésel y eléctrica. La Tabla 6 reproduce esos valores y calcula la razón de sobreprecio resultante para cada equipo.

Equipo de apoyo en tierra	**Diésel (USD)**	**Eléctrico (USD)**	**Razón**
Pax Boarding Stair	26.000	40.285	1,55
Belt Conveyor Loader	25.000	40.000	1,60
Baggage Towing Tractor	32.500	42.000	1,29
High Lift Loader	23.000	37.000	1,61
Forklift	45.000	59.000	1,31
Push Back / ATT Wide Body	116.000	130.000	1,12
Ground Power Unit 180 KVA	32.000	44.000	1,38
Total de la flota	**299.500**	**392.285**	**1,31**

Tabla 6: Inversión en equipos de apoyo en tierra según tipo de propulsión
Fuente: elaboración propia a partir de Sari et al. (2022).

El dato de mayor relevancia para este estudio es el correspondiente al tractor Push-Back para aeronaves de fuselaje ancho, que constituye precisamente el equipo evaluado en esta memoria: su versión eléctrica presenta un sobreprecio de 12% respecto de la diésel. Resulta asimismo significativo que el promedio del conjunto de la flota alcance una razón de 1,31 notoriamente superior. Ello se explica porque en los equipos de menor tamaño como escaleras, cintas transportadoras y plataformas elevadoras, el costo de la batería representa una proporción mucho mayor del valor total del equipo, mientras que en un tractor Push-Back el chasis, la transmisión y la estructura de tracción concentran la mayor parte del costo, diluyendo la incidencia del sistema de almacenamiento de energía.

Contraste con el mercado automotriz. La segunda aproximación se construye sobre precios de lista vigentes en el mercado chileno. Se emplean dos modelos: el Hyundai Kona, automóvil de uso particular que se comercializa en versión de combustión interna y cien por ciento eléctrica sobre una misma plataforma, y la Toyota Hilux, camioneta de trabajo cuya versión convencional emplea motor diésel, la misma tecnología de los tractores Push-Back y que se comercializa habitualmente en régimen de flota. Las Tablas 7 y 8 presentan los precios y las razones resultantes.

Versión	**Precio (CLP)**	**Razón**	**Sobreprecio absoluto (CLP)**
KONA SX2 1.6T AT 4WD N-Line (combustión)	35.790.000	1,00 (referencia)	—
KONA SX2 EV GO LR (eléctrico, 64,8 kWh)	40.090.000	1,12	4.300.000

Tabla 7: Precios del Hyundai Kona por variante de propulsión
Fuente: elaboración propia a partir de los precios publicados por Hyundai Chile (2026). Valores al contado, con IVA incluido y sin bonos ni descuentos por financiamiento.

El Hyundai Kona arroja una razón de 1,12, valor idéntico al reportado por Sari et al. (2022) para el tractor Push-Back de fuselaje ancho. Se trata de dos fuentes independientes entre sí, una correspondiente al mercado de equipos de apoyo en tierra del sudeste asiático y otra al mercado automotriz chileno, separadas además por varios años que convergen en el mismo resultado.



Imagen 8: Toyota Hilux 4x4 2.8 AT

La segunda referencia es la **Toyota Hilux**. Su elección responde a que se trata de un vehículo de trabajo y no de un automóvil de uso particular, a que su versión convencional emplea motor diésel y a que es la camioneta de mayor venta del mercado nacional, lo que asegura precios de lista públicos y transparentes para ambas variantes de propulsión. Se emplea la versión diésel de mayor precio de la gama, criterio deliberadamente conservador: al contrastar la variante eléctrica contra la alternativa convencional más cara, el sobreprecio resultante constituye la estimación mínima del diferencial. La Tabla 8 presenta los valores.

Versión	**Precio (CLP)**	**Razón**	**Sobreprecio absoluto (CLP)**
Hilux 4x4 2.8 AT (diésel, versión superior)	53.190.000	1,00 (referencia)	—
Hilux BEV AWD (eléctrica, 59,2 kWh)	68.990.000	1,30	15.800.000

Tabla 8: Precios de la Toyota Hilux por variante de propulsión
Fuente: elaboración propia a partir de los precios publicados por Toyota Chile y Rutamotor (2026). Valores al contado, con IVA incluido y sin bonos ni descuentos por financiamiento.

La razón obtenida es de 1,30: la variante eléctrica cuesta $15.800.000 más que la versión diésel de mayor precio de la gama, lo que equivale a un 29,7% adicional. Este valor no coincide con el del tractor Push-Back sino con la razón de 1,31 correspondiente al conjunto de la flota de equipos de apoyo en tierra de la Tabla 6. La correspondencia es doblemente significativa. Por una parte, la Hilux constituye el término de comparación más próximo al objeto de estudio, por tratarse de un vehículo de trabajo de propulsión diésel y no de un automóvil de uso particular. Por otra, la

magnitud de su sobreprecio reproduce la del promedio sectorial, lo que sugiere que el orden del 30% no es un valor aislado del mercado automotriz nacional sino la magnitud característica de la electrificación de equipos de trabajo de tamaño medio.



Imagen 9: Toyota Hilux BEV AWD

El resultado conjunto de ambas comparaciones es que las dos razones retenidas en este estudio quedan respaldadas de manera independiente. La razón de 1,12 se obtiene simultáneamente del dato sectorial correspondiente al equipo específicamente evaluado y del mercado automotriz de vehículos de pasajeros. La razón de 1,31 se obtiene del promedio de la flota completa de equipos de apoyo en tierra y del mercado automotriz de vehículos de trabajo. No se trata, por tanto, de un valor central acompañado de una holgura arbitraria, sino de dos estimaciones con fundamento propio.

En consecuencia, para el desarrollo del estudio se adopta como caso base una **razón de sobreprecio de 1,12**, equivalente a un 12% adicional sobre el precio del equipo diésel, por provenir del dato sectorial correspondiente al equipo específicamente evaluado y encontrarse validada por el mercado automotriz nacional.

Complementariamente, la razón de 1,31 se conserva como **escenario conservador** del análisis de sensibilidad, respaldada tanto por el promedio de la flota completa de equipos de apoyo en tierra como por el diferencial observado entre las dos variantes de la Toyota Hilux. Su incorporación

permite evaluar la robustez de la conclusión ante un sobreprecio sustancialmente mayor al del caso base, escenario que podría materializarse si el equipo cotizado incorpora una configuración de batería de mayor capacidad o si las condiciones de importación resultan menos favorables que las supuestas.

Deben declararse cuatro limitaciones de los valores empleados. Los montos reportados por Sari et al. corresponden a una empresa de servicios de rampa que opera en el sudeste asiático, por lo que no incorporan los costos de internación al mercado chileno. La fuente original de dichos valores se remonta al año 2017, de modo que requieren actualización monetaria. El estudio no especifica marca, modelo ni capacidad de tracción del tractor, más allá de su clasificación para aeronaves de fuselaje ancho. Y en el caso de la Toyota Hilux, la versión eléctrica corresponde a la novena generación del modelo, mientras que las versiones diésel disponibles en Chile pertenecen a la generación anterior, de modo que el diferencial observado incorpora no solo el cambio de tecnología de propulsión sino también el salto generacional del vehículo. Por estas razones las razones de sobreprecio se emplean como estimadores del diferencial relativo entre tecnologías y no como fuente del precio absoluto, el cual se aborda mediante los escenarios descritos en el apartado 2.3.

2.2.4 Combustión interna vs electricidad en el costo y autonomía

Establecido el diferencial de inversión inicial, corresponde comparar el costo de la energía y la autonomía de ambas tecnologías. La dificultad metodológica radica en que el consumo de un vehículo de combustión se expresa en litros y el de uno eléctrico en kilovatios-hora, magnitudes que no son directamente comparables. La homologación se realiza llevando ambos consumos a una unidad monetaria común referida a una misma distancia recorrida:

Costo energético por 100 km = Consumo cada 100 km × Precio unitario de la energía

Los precios unitarios considerados corresponden a los vigentes en el mercado chileno durante 2026. Tras el alza de marzo de ese año, la gasolina de 93 octanos alcanzó un valor de referencia de $1.541 por litro (Autopedia, 2026). En cuanto a la energía eléctrica, la tarifa BT1 aplicable a clientes residenciales y pequeños comercios se sitúa entre $105 y $170 por kWh según la zona y la empresa distribuidora, mientras que la carga pública rápida se comercializa entre $200 y $350 por kWh. Para los cálculos que siguen se adopta un valor medio de $140 por kWh en carga domiciliaria.

La versión de combustión interna cuenta con un estanque de 47 litros y rendimientos declarados de 11,2 km/L en ciudad y 17,8 km/L en carretera, de los que se desprende un rendimiento mixto estimado de 14,5 km/L. Ello se traduce en autonomías de 526, 682 y 837 kilómetros para uso urbano, mixto y en carretera respectivamente (Hyundai, 2026). La versión eléctrica GO LR declara una autonomía de 505 kilómetros bajo ciclo WLTP y un consumo de 4,8 km/kWh según la etiqueta chilena de eficiencia energética 3CV (Hyundai, 2026). La Tabla 9 contrasta ambas variantes.

Parámetro	**KONA 1.6T (combustión)**	**KONA EV GO LR (eléctrico)**
Motorización	Motor 1.6 L turbo, 195 hp	Motor síncrono de imán permanente, 150 kW / 201 hp
Almacenamiento de energía	Estanque de 47 litros	Batería de polímero de ion-litio, 64,8 kWh / 358 V
Rendimiento en ciudad	11,2 km/L	—
Rendimiento mixto	14,5 km/L (estimado)	4,8 km/kWh (etiqueta 3CV)
Rendimiento en carretera	17,8 km/L	—
Autonomía en ciudad	526 km	—
Autonomía mixta	682 km	505 km (WLTP)
Autonomía en carretera	837 km	—
Consumo por 100 km	6,90 L	12,8 kWh (WLTP) / 20,8 kWh (3CV)
Costo energético por 100 km (uso mixto)	$10.628	$1.796 (WLTP) / $2.917 (3CV)
Costo relativo respecto del bencinero	100%	17% (WLTP) / 27% (3CV)
Reabastecimiento	Minutos	45 min (0–80%, cargador de 100 kW); 6 h 35 min (0–100%, cargador de 7,4 kW)
Garantía de la batería	No aplica	96 meses (8 años) o 160.000 km

Tabla 9: Comparación del Hyundai Kona en sus dos variantes de propulsión
Fuente: elaboración propia a partir de las fichas técnicas de Hyundai Chile. Costos calculados con gasolina 93 a $1.541 por litro y tarifa eléctrica de $140 por kWh.

La comparación arroja tres conclusiones. En primer lugar, la brecha de costo energético es sustantiva: bajo el escenario más conservador empleando el consumo de la etiqueta chilena de eficiencia energética y tarifa domiciliaria el vehículo eléctrico cuesta un 27% de lo que cuesta su equivalente bencinero por cada 100 kilómetros recorridos, y bajo el ciclo WLTP esa cifra baja al 17%. El ahorro se sitúa así entre $7.700 y $8.800 por cada 100 kilómetros, y es precisamente esta brecha, proyectada sobre la vida útil del equipo, la que sustenta económicamente la sustitución tecnológica que se evalúa en el Capítulo III.

En segundo lugar, conviene advertir la diferencia entre ambas mediciones de consumo. El ciclo WLTP se mide en laboratorio y el propio fabricante señala que la autonomía resultante puede verse afectada por el modo de conducción, mientras que la etiqueta 3CV corresponde a la homologación chilena de eficiencia energética y arroja un consumo un 62% superior. Para la evaluación económica se adopta el valor más conservador de modo que, si el resultado favorece a la alternativa eléctrica bajo ese supuesto, la conclusión resulta robusta frente a un escenario más favorable.

En tercer lugar, la autonomía de la variante eléctrica es inferior a la de su equivalente bencinero 505 kilómetros frente a 682 en uso mixto y el reabastecimiento requiere entre 45 minutos con cargador rápido de 100 kW y 6 horas y 35 minutos con cargador domiciliario de 7,4 kW, frente a los pocos minutos que toma cargar combustible. Esta asimetría es determinante en el uso automotriz particular, donde los recorridos son variables y no siempre existe una base de retorno.

Sin embargo, la relevancia de esta limitación disminuye significativamente en el caso de un tractor Push-Back, cuyo perfil operacional se caracteriza por recorridos acotados dentro del recinto aeroportuario, retorno sistemático a una base con infraestructura de carga y horarios de trabajo predecibles. A ello se suma que el BISON E 620 dispone de un cargador integrado de 70 kW en corriente continua, muy superior a los 7,4 kW del cargador domiciliario del automóvil, lo que reduce sustancialmente los tiempos de reposición de energía.

Esta apreciación se encuentra respaldada por la literatura. El estudio realizado sobre la flota de equipos de apoyo en tierra del Aeropuerto de Ámsterdam Schiphol concluye que, para aquellos equipos capaces de cubrir una jornada completa con una sola carga, el reemplazo puede efectuarse en una proporción de uno a uno respecto de sus equivalentes convencionales, siempre que exista una ventana de recarga nocturna (Timmermans, 2025). Cuando esa condición no se cumple, los mismos autores identifican cuatro mecanismos de ajuste: incrementar el número de vehículos, recargar durante las horas operativas mediante carga de oportunidad, emplear baterías de mayor capacidad o utilizar equipos de mayor eficiencia.

En el caso del BISON E 620, la disponibilidad de tres configuraciones de batería (80, 120 y 160 kWh) y de un cargador integrado de 70 kW permite abordar el tercero y el segundo de estos mecanismos sin necesidad de aumentar el número de equipos, evitando así un sobrecosto de inversión. Los valores de consumo y autonomía específicos del tractor no son publicados por el fabricante y deben solicitarse en la cotización, por lo que las cifras del mercado automotriz

presentadas en este apartado cumplen la función de establecer el orden de magnitud del ahorro esperable y no la de reemplazar el dato del equipo.

2.2.5 Regresión Lineal

La evaluación del proyecto se extiende sobre un horizonte de diez años, por lo que resulta indispensable proyectar el precio futuro del combustible, que es la variable que determina la magnitud del ahorro operacional calculado en el apartado anterior. Mantener el precio actual constante durante toda la evaluación subestimaría sistemáticamente dicho ahorro y sesgaría el resultado en contra del proyecto, considerando que el valor del petróleo diésel se incrementó cerca de un 190% entre 2016 y 2026. Para evitarlo se emplea el método de regresión lineal simple sobre la serie histórica de precios publicada por la Comisión Nacional de Energía.

La regresión lineal simple busca la recta que mejor describe la relación entre una variable independiente y una dependiente, minimizando la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores observados y los estimados por el modelo. Su expresión es la siguiente:

$$y = a + b \cdot x$$

donde y corresponde al precio proyectado del combustible, x al período considerado, a la intersección con el eje de ordenadas, es decir, el precio estimado en el período inicial y b a la pendiente de la recta, que representa la variación promedio del precio por unidad de tiempo. La bondad del ajuste se evalúa mediante el coeficiente de determinación R^2, que indica qué proporción de la variabilidad observada en los precios queda explicada por el modelo.

La aplicación de este método sobre la serie histórica permite estimar el precio esperado para cada uno de los años del horizonte de evaluación. El mismo procedimiento se aplica a la tarifa eléctrica, de modo que la proyección del ahorro operacional incorpore la evolución de ambos precios y no solo la del combustible.

El método presenta limitaciones que deben reconocerse explícitamente. La regresión lineal asume que la tendencia histórica se mantiene en el futuro, supuesto que no captura los efectos de shocks geopolíticos, cambios en la política tributaria ni modificaciones al Mecanismo de Estabilización de Precios de los Combustibles descrito en el punto 2.1.7. Por esta razón, la proyección obtenida no se emplea como un valor único, sino como el escenario base de un análisis de sensibilidad que contempla trayectorias alternativas de precio.

2.2.6 Modelo de costo global

La evaluación económica del reemplazo se aborda mediante un modelo de costo global, que considera de manera integral los desembolsos asociados al equipo durante todo su ciclo de vida y no únicamente su precio de adquisición. El CAPEX (*Capital Expenditure*) corresponde a la inversión requerida para adquirir y poner en servicio un activo, mientras que el OPEX (*Operational Expenditure*) agrupa los desembolsos recurrentes necesarios para operarlo durante su vida útil. Evaluar únicamente el CAPEX conduciría a una conclusión errónea, puesto que la ventaja de la tecnología eléctrica no reside en su precio de compra que es mayor, como se demostró en el apartado 2.2.3 sino en su menor costo de operación, cuantificado en el apartado 2.2.4.

En consecuencia, la comparación entre ambas alternativas se realiza sobre el costo total descontado a lo largo del horizonte de evaluación, según la siguiente estructura:

$$\textit{Costo total} = \textit{CAPEX} + \Sigma\,(\textit{OPEX anual descontado}) + \textit{Reemplazos mayores} - \textit{Valor residual}$$

El CAPEX comprende el precio del equipo puesto en Chile incluyendo transporte, seguros, derechos de internación e impuesto al valor agregado, la obra eléctrica y la infraestructura de carga en el caso de la alternativa eléctrica, y los permisos de acceso vehicular al recinto aeroportuario. El OPEX incorpora el costo energético horario y los costos de mantenimiento preventivo y correctivo. Los reemplazos mayores corresponden, en la variante eléctrica, a la sustitución del paquete de baterías al término de su vida útil, estimada a partir del número de ciclos de carga que admite. El valor residual representa el valor de recuperación del equipo al final del horizonte de evaluación.

Los flujos anuales se llevan a valor presente mediante una tasa de descuento que refleja el costo de capital exigido al proyecto, aplicando el factor de actualización correspondiente a cada período:

$$\textit{Factor de descuento} = 1 \div (1 + i)^n$$

Donde i corresponde a la tasa de descuento real y n al año del flujo. La suma de los flujos descontados de cada alternativa permite compararlas sobre una base homogénea.

El modelo presenta una particularidad derivada de la restricción de información ya señalada: al no existir precios públicos para ninguno de los dos tractores, no es posible calcular un valor absoluto de inversión. Por esta razón, el resultado principal del modelo no es un costo total sino el **sobreprecio máximo admisible** de la alternativa eléctrica, definido como la diferencia máxima de

precio de compra que puede existir entre ambos equipos sin que el proyecto deje de ser conveniente:

$$\textit{Sobreprecio máximo admisible} = \textit{Ahorro operacional acumulado (valor presente)} - \textit{Ajuste por diferencia de valor residual}$$

Esta formulación tiene una ventaja metodológica relevante: el umbral se obtiene sin necesidad de conocer ninguno de los dos precios de compra, ya que depende exclusivamente del ahorro operacional y del valor residual. Una vez recibidas las cotizaciones de los proveedores, basta contrastar el diferencial real de precio contra este umbral para determinar la conveniencia del reemplazo. Complementariamente, la razón de sobreprecio estimada a partir del mercado automotriz en el apartado 2.2.3 permite anticipar dicho contraste antes de disponer de las cotizaciones.

2.3 Propuesta Metodológica

La propuesta metodológica que se desprende de los antecedentes y del marco teórico expuestos se estructura en cuatro etapas sucesivas, cada una de las cuales entrega los insumos necesarios para la siguiente. La secuencia está diseñada para sortear la principal restricción de información del estudio, la ausencia de precios públicos de los tractores mediante el trabajo con escenarios de precio en lugar de un valor único.

Primera etapa: sensibilidad del precio de los equipos. Dado que los precios de venta de los tractores no son públicos y varían según las condiciones negociadas por cada operador, la evaluación no se construye sobre un valor único sino sobre tres escenarios de precio para el tractor diésel, cuyo origen y fundamentación se detallan en el Capítulo III. Sobre cada escenario se aplica la razón de sobreprecio de 1,12 establecida en el apartado 2.2.3, obteniéndose el precio estimado del equipo eléctrico correspondiente, y se repite el ejercicio con la razón de 1,31 a título de escenario conservador. El propósito de esta etapa es doble: establecer el rango de inversión inicial con el que se trabajará y, simultáneamente, permitir identificar bajo qué combinaciones de precio y sobreprecio la sustitución resulta económicamente admisible.

Segunda etapa: proyección de los precios de la energía. Mediante regresión lineal simple aplicada sobre las series históricas publicadas por la Comisión Nacional de Energía se proyectan el precio del petróleo diésel y la tarifa eléctrica a lo largo del horizonte de evaluación. Esta proyección resulta indispensable porque el ahorro operacional de la alternativa eléctrica depende directamente de la

brecha entre ambos precios, y mantener sus valores actuales constantes durante diez años subestimaría sistemáticamente dicho ahorro. El resultado de esta etapa es una serie de precios año a año para ambos energéticos.

Tercera etapa: determinación de las horas operacionales. El costo operacional anual depende del tiempo efectivo durante el cual el equipo se encuentra trabajando, magnitud que no coincide con la jornada laboral del operador. Una maniobra de Push-Back tiene una duración aproximada de cinco a diez minutos, de modo que el tractor permanece detenido durante la mayor parte del turno. Para estimar este parámetro se contrastará la cobertura operacional declarada por la empresa de servicios de rampa con los factores de utilización medidos en la literatura, que para equipos de apoyo en tierra del Aeropuerto de Ámsterdam Schiphol se sitúan entre un 21% y un 26% del tiempo total disponible (Timmermans et al., 2025), y con los perfiles de carga documentados a lo largo de la jornada para el Aeropuerto Internacional de Guangzhou Baiyun (Yan et al., 2026). El resultado es el número de horas efectivas de operación al año, parámetro de mayor incidencia sobre el resultado final del estudio.

Cuarta etapa: evaluación mediante el modelo de costo global. Con los escenarios de precio de la primera etapa, las proyecciones energéticas de la segunda y las horas efectivas de la tercera, se construye el flujo de costos año a año de ambas alternativas, incorporando la inversión inicial, los costos de operación y mantenimiento, el reemplazo del paquete de baterías y el valor residual. Los flujos se llevan a valor presente aplicando la tasa de descuento definida, y se determina para cada escenario el sobreprecio máximo admisible de la alternativa eléctrica.

El contraste entre dicho umbral y la razón de sobreprecio establecida en el apartado 2.2.3 constituye el criterio de decisión del estudio. Cuando el sobreprecio máximo admisible supera el 12% estimado, el reemplazo resulta conveniente bajo ese escenario de precio; cuando queda por debajo, no lo es. La evaluación se repite frente al escenario conservador de 1,31 con el objeto de establecer la robustez de la conclusión.

De este modo el resultado del estudio no consiste en una afirmación categórica sobre la conveniencia del reemplazo, sino en la identificación de las condiciones de precio y de intensidad de uso bajo las cuales la inversión se justifica. Este enfoque reconoce que los precios de adquisición son confidenciales y variables entre operadores, y entrega en su lugar un criterio que una empresa de servicios de rampa puede aplicar directamente sobre la cotización que efectivamente reciba.

3. Capítulo III: Desarrollo

El presente capítulo aplica la propuesta metodológica formulada en el apartado 2.3 sobre los datos recolectados. Conforme a lo señalado, la evaluación no se construye sobre un precio único de los equipos —que no es público y varía según las condiciones negociadas por cada operador— sino sobre escenarios de inversión declarados, cuya fundamentación se expone a continuación.

3.1. Marco de precio

3.1.1. Precio de referencia del equipo

Ante la ausencia de precios de lista para el BISON D 620 y BISON E 620, se definen tres escenarios de precio del tractor diésel, expresados en dólares estadounidenses. La Tabla 10 los presenta junto a su equivalente en pesos chilenos. Para fines convenientes del desarrollo, se tomará que un dólar es equivalente a 1000 pesos chilenos.

Para seguir el proceso de referencias de equipos, y precios posibles, se tomarán 3 valores especulativos del costo del equipo, para ayudar a formar un criterio estable en la evaluación de inversión.

Escenario	**Precio en origen (USD)**	**Equivalente (CLP)**	**Fundamento**
E1 — Bajo	100.000	100.000.000	Valor documentado por Sari et al. (2022), USD 116.000
E2 — Medio	200.000	200.000.000	Configuración superior o condiciones comerciales desfavorables
E3 — Alto	300.000	300.000.000	Cota superior para verificación de robustez

Tabla 10: Escenarios de precio del tractor diésel en origen
Fuente: elaboración propia. Paridades asumidas.

El escenario bajo se ancla en el único valor documentado en la literatura para un tractor Push-Back: los USD 116.000 reportados por Sari et al. (2022) para un equipo de fuselaje ancho, equivalentes a $116 millones. Dicho valor corresponde a la misma clase de capacidad que el equipo evaluado en esta memoria, de modo que el precio de referencia y el objeto de análisis pertenecen a la misma categoría y no requieren ajuste por tamaño. Dado que los datos se remontan al año 2017 y no incorporan actualización monetaria, se adopta un valor redondeado de USD 100.000 como cota inferior conservadora, con lo cual el valor documentado queda comprendido entre el escenario bajo

y el medio. El escenario medio duplica la cota inferior y representa un equipo con configuración superior o adquirido en condiciones comerciales menos favorables. El escenario alto la triplica y opera como cota superior de la evaluación, destinada a verificar la robustez de las conclusiones.

Con el objeto de evitar distorsiones asociadas a la volatilidad cambiaria y de facilitar la lectura de los resultados, se asumen explícitamente una paridad monetaria que se mantiene constante a lo largo de todo el desarrollo. Como base el tipo de cambio de **USD 1 = CLP 1.000**, valor cercano al dólar observado publicado por el Banco Central de Chile al 17 de septiembre de 2026, de $952,85.

La adopción de este supuesto responde a un criterio de transparencia metodológica. Al tratarse de una evaluación construida sobre escenarios de precio y no sobre cotizaciones efectivas, la precisión del tipo de cambio resulta marginal frente a la incertidumbre del precio del equipo, que es de un orden de magnitud superior. El uso de paridades redondas permite además que cualquier lector reconstruya los cálculos sin ambigüedad y los actualice a los valores vigentes a la fecha de una decisión de inversión. El efecto de esta variable sobre los resultados se aborda en el análisis de sensibilidad del apartado 3.6.

3.1.2. Escenarios de precio y sobreprecio de electrificación

Sobre cada escenario se aplica la razón de sobreprecio de 1,12 establecida en el apartado 2.2.3 como caso base, y la razón de 1,31 como caso conservador. Conviene recordar que ambas cuentan con respaldo independiente por duplicado: la primera se obtiene tanto del dato sectorial correspondiente al tractor Push-Back de fuselaje ancho como de la comparación del Hyundai Kona, y la segunda, tanto del promedio de la flota completa de equipos de apoyo en tierra como de la comparación de la Toyota Hilux. La Tabla 11 presenta el precio en origen resultante para el BISON E 620 en cada combinación.

Escenario	**Diésel (CLP)**	**Eléctrico, razón 1,12 (CLP)**	**Sobreprecio implícito**	**Eléctrico, razón 1,31 (CLP)**	**Sobreprecio implícito**
E1 — Bajo	100.000.000	112.000.000	12.000.000	131.000.000	31.000.000
E2 — Medio	200.000.000	224.000.000	24.000.000	262.000.000	62.000.000
E3 — Alto	300.000.000	336.000.000	36.000.000	393.000.000	93.000.000

Tabla 11: Precio en origen estimado del tractor eléctrico según escenario y razón de sobreprecio
Fuente: elaboración propia a partir de las razones establecidas en el apartado 2.2.3.

Corresponde verificar la consistencia de estos valores frente a la evidencia disponible sobre el costo incremental de la electrificación. Un análisis de los siete equipos reportados por Sari et al. (2022) muestra que el sobreprecio de la versión eléctrica se comporta como un monto aproximadamente fijo cercano a USD 14.000, equivalentes a $14 millones y no como un porcentaje del precio del equipo. Cinco de los siete equipos presentan incrementos de entre USD 14.000 y 15.000, con independencia de que su precio base varíe entre USD 23.000 y 116.000. Este comportamiento es coherente con la naturaleza del sobrecosto, que corresponde esencialmente al sistema de baterías y a la electrónica de potencia, componentes cuyo valor no escala con el tamaño del chasis.

Aplicado a los escenarios definidos, ese incremento fijo implica razones de 1,14 para el escenario bajo, 1,07 para el medio y 1,05 para el alto. El caso base de 1,12 coincide con el escenario bajo y resulta conservador para los escenarios medio y alto, lo que respalda su adopción.

La incorporación de la Toyota Hilux al apartado 2.2.3 permite someter esta regularidad a una prueba adicional. El sobreprecio absoluto de su variante eléctrica asciende a $15.800.000, equivalentes a USD 15.800, magnitud que se sitúa inmediatamente por encima de la banda de USD 14.000 a 15.000 observada en los equipos de apoyo en tierra. La coincidencia resulta destacable por tratarse de mercados distintos, de productos distintos y de datos separados por casi una década, y refuerza la interpretación del sobreprecio como un monto fijo asociado al sistema de almacenamiento de energía y a la electrónica de potencia, antes que como una proporción del precio del equipo.

Debe señalarse, en cambio, que el Hyundai Kona no reproduce esa regularidad: su sobreprecio absoluto es de $4.300.000, equivalentes a USD 4.300, muy por debajo de la banda referida pese a montar una batería de capacidad comparable a la de la Hilux. La discrepancia se explica porque en el Kona se contrasta una versión de combustión de gama alta con una versión eléctrica de equipamiento intermedio, de modo que el diferencial observado mezcla el cambio de tecnología de propulsión con una diferencia de equipamiento. Por esta razón el Kona resulta útil como verificación de la razón relativa, donde coincide exactamente con el dato sectorial del tractor Push-Back pero no como referencia del monto absoluto, función para la cual la Toyota Hilux constituye el término de comparación apropiado.

No obstante, dicho incremento proviene de datos de 2017 y corresponde con toda probabilidad a equipos con baterías de plomo-ácido. El BISON E 620 monta baterías de ion-litio de 80 a 160 kWh,

cuyo costo es sustancialmente mayor. Como referencia del límite superior, el programa de incentivos CORE de la Junta de Recursos del Aire de California fija los montos máximos de subsidio para tractores de aeronave que por norma no pueden exceder el costo incremental del equipo en USD 80.000 para tecnología plomo-ácido y USD 200.000 para ion-litio, equivalentes a $80 y $200 millones respectivamente (California Air Resources Board, 2025). Esos valores corresponden a tractores de más de 22 toneladas, clase superior a la del equipo evaluado, por lo que se emplean únicamente como cota.

El caso conservador de 1,31 implica incrementos de entre $31 y $93 millones según el escenario, rango que se sitúa dentro del límite de plomo-ácido del programa CORE y por debajo del límite de ion-litio. Este caso no constituye una holgura arbitraria sobre el caso base: la misma razón se obtiene de manera independiente del promedio de la flota completa de equipos de apoyo en tierra y del diferencial de 29,7% observado entre las dos variantes de la Toyota Hilux, según se estableció en el apartado 2.2.3. En consecuencia, los dos casos adoptados acotan razonablemente el sobreprecio esperable, y la determinación definitiva queda sujeta al valor del paquete de baterías que se obtenga en la cotización, dato que debe solicitarse de manera explícita al fabricante.

3.1.3. Estructura del CAPEX en Chile

El precio en origen no corresponde a la inversión efectiva, que debe incorporar los costos de puesta en Chile y en operación. La estructura de la inversión inicial se construye sobre los componentes identificados en el apartado 2.2.6, adoptando como referencia las proporciones observadas en un proceso de compra real de un equipo de apoyo en tierra importado a Chile (Cardenas, 2025).

El flete internacional y el seguro se estiman en un 7% del precio en origen. Los costos de internación, que comprenden derechos aduaneros, gastos de agente de aduana y desaduanaje se estiman en un 6%. Cabe señalar que el tratado de libre comercio entre Chile y la Unión Europea exime de arancel a los bienes de origen alemán, por lo que este porcentaje constituye una provisión conservadora que cubre los gastos de gestión. El impuesto al valor agregado, de 19%, se aplica sobre el valor CIF más los costos de internación. El pase de acceso vehicular al recinto aeroportuario se considera por un período de diez años, con un valor de referencia de $95.010.

Para la alternativa eléctrica se agrega la infraestructura de carga. El BISON E 620 incorpora un cargador de 70 kW en corriente continua integrado al equipo, por lo que la inversión requerida corresponde a la obra eléctrica de alimentación: acometida, tablero, protecciones y punto de

conexión dimensionados para esa potencia. Como referencia se adopta el valor de USD 30.000 que el programa CORE establece para infraestructura de carga de 50 kW o más, equivalente a $30 millones (California Air Resources Board, 2025). La Tabla 12 presenta la inversión inicial desglosada para cada escenario bajo el caso base.

Componente (millones de CLP)	**E1 diésel**	**E1 eléctrico**	**E2 diésel**	**E2 eléctrico**	**E3 diésel**	**E3 eléctrico**
Precio del equipo en origen	100,0	112,0	200,0	224,0	300,0	336,0
Flete internacional y seguro (7%)	7,0	7,8	14,0	15,7	21,0	23,5
Internación y desaduanaje (6%)	6,0	6,7	12,0	13,4	18,0	20,2
IVA (19% sobre CIF + internación)	21,5	24,0	42,9	48,1	64,4	72,1
Pase de acceso vehicular (10 años)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Infraestructura de carga (70 kW)	—	30,0	—	30,0	—	30,0
Inversión inicial total	**134,6**	**180,7**	**269,0**	**331,3**	**403,5**	**481,9**
Diferencia eléctrico − diésel		46,1		62,3		78,4

Tabla 12: Inversión inicial desglosada por escenario, caso base (razón 1,12)
Fuente: elaboración propia. Proporciones de flete, internación e IVA según Cárdenas (2025); infraestructura de carga según California Air Resources Board (2025).

Dos observaciones se desprenden de la Tabla 12. En primer lugar, la infraestructura de carga y el IVA sobre un precio mayor amplifican el diferencial de inversión: mientras el sobreprecio en origen bajo el caso base es de $12 millones en el escenario bajo, la diferencia de inversión total asciende a $46,1 millones, es decir, un 34% sobre la inversión diésel. En los escenarios medio y alto el diferencial total alcanza $62,3 y $78,4 millones, equivalentes a 23% y 19% respectivamente. Esto significa que el sobreprecio relevante para la evaluación económica no es el del equipo, sino el de la inversión puesta en operación.

En segundo lugar, la infraestructura de carga es un costo que se incurre una sola vez y que puede compartirse entre varios equipos. En el caso de un reemplazo de flota y no de una unidad aislada, dicho componente se prorratea entre los tractores que la utilicen, reduciendo proporcionalmente el diferencial por unidad. La evaluación del presente estudio se realiza sobre una unidad, lo que constituye el caso más desfavorable para la alternativa eléctrica.

Los valores de inversión inicial obtenidos constituyen el primer insumo del modelo de costo global y se emplean en el apartado 3.4 junto con los costos operacionales derivados de las secciones siguientes.

3.2. Caracterización operacional

Determinada la inversión inicial, corresponde caracterizar el régimen de trabajo del equipo. Los costos operacionales dependen de dos magnitudes que deben establecerse por separado: el tiempo durante el cual el tractor opera efectivamente a lo largo del año y la cantidad de energía que consume por cada hora de esa operación. Ambas se determinan a continuación.

3.2.1. Horas de operación

La jornada laboral del operador no coincide con el tiempo de trabajo efectivo del equipo. Una maniobra de Push-Back tiene una duración aproximada de cinco a diez minutos, de modo que el tractor permanece detenido durante la mayor parte del turno a la espera de la siguiente operación. Emplear la cobertura del turno como base de cálculo sobrestimaría el consumo en un orden de magnitud.

La magnitud que corrige esta diferencia es el factor de utilización efectiva, definido como la proporción del tiempo total disponible durante la cual el equipo se encuentra ejecutando tareas, incluido el desplazamiento entre posiciones. Ante la imposibilidad de acceder a registros horarios de la flota del Aeropuerto Arturo Merino Benítez, este parámetro se adopta de la literatura.

El estudio realizado sobre la flota de equipos de apoyo en tierra de KLM en el Aeropuerto de Ámsterdam Schiphol reporta factores de utilización medidos de 21% para cintas transportadoras y 26% para camiones de agua, calculados como el cociente entre el tiempo dedicado a tareas y las veinticuatro horas del día (Timmermans, 2025). Estos valores constituyen la referencia empírica más sólida disponible, por provenir de mediciones sobre una operación real y de gran escala. De manera complementaria, el análisis del perfil de carga de seis tipos de equipos eléctricos en el Aeropuerto Internacional de Guangzhou Baiyun confirma el carácter intermitente de la operación, con misiones de aproximadamente diez minutos de duración para los tractores de remolque de aeronaves (Yan, 2026).

Se adopta como caso base el valor de 21%, por ser el menor de los dos reportados por Timmermans y por tanto el más conservador. Los valores de 15% y 26% se incorporan como cotas inferior y superior del análisis de sensibilidad. La Tabla 13 presenta las horas efectivas anuales resultantes, calculadas sobre una operación continua de trescientos sesenta y cinco días.

Escenario	Factor de utilización	Horas efectivas diarias	Horas efectivas anuales
Cota inferior	15%	3,60	1.314
Caso base	21%	5,04	1.840
Cota superior	26%	6,24	2.278

Tabla 13: Horas efectivas de operación anual según factor de utilización
Fuente: elaboración propia a partir de Timmermans et al. (2025).

Debe declararse una limitación de este traslado. Los factores reportados por Timmermans corresponden a cintas transportadoras y camiones de agua, no a tractores de remolque, cuyo patrón de asignación podría diferir. No obstante, ambos equipos comparten con el tractor la condición de operar asociados al ciclo de atención de la aeronave, lo que respalda el orden de magnitud adoptado. La verificación de este parámetro con registros de la operación local constituye la principal recomendación de mejora del presente estudio.

3.2.2. Consumo energético de ambas tecnologías

El consumo por hora de operación no es publicado por el fabricante para ninguna de las dos versiones del BISON 620, por lo que se deriva a partir de la potencia instalada, del factor de carga del motor y del rendimiento de cada cadena de tracción.

El factor de carga expresa la fracción de la potencia nominal efectivamente demandada durante la operación. Sznajderman et al. (2022) determinan un valor de 0,22 para tractores de aeronave en circulación dentro de la plataforma. Dado que dicho valor corresponde al desplazamiento y no a la maniobra de empuje, durante la cual el motor trabaja considerablemente más cargado, por lo tanto se adoptan tres escenarios: 0,22 como cota inferior, 0,40 como caso base y 0,55 como cota superior, este último coincidente con el valor por defecto que la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos asigna a los tractores de aeronave.

Para la variante diésel, el consumo se obtiene del producto entre la potencia nominal, el factor de carga y el consumo específico de combustible, dividido por la densidad del diésel:

$$\textit{Consumo (L/h)} = \textit{Potencia (HP)} \times \textit{Factor de carga} \times \textit{Consumo específico (g/HP·h)} \div \textit{Densidad (g/L)}$$

El BISON D 620 desarrolla 115 kW, equivalentes a 154 HP. El consumo específico adoptado es de 166 g/HP·h, correspondiente al valor de 0,367 libras por caballo-hora que establece el modelo

NONROAD de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos para motores diésel fuera de carretera. La densidad del combustible se considera en 840 g/L.

Cabe señalar una inconsistencia detectada en la literatura consultada. Sznajderman et al. (2022) reportan un factor de emisión de 198 g de CO_2 por caballo-hora para todos los equipos de apoyo en tierra. Al invertir dicho valor mediante la relación estequiométrica entre combustible y dióxido de carbono, se obtiene un consumo específico implícito de 84 g/kWh, que corresponde a un rendimiento térmico superior al 100% y resulta por tanto físicamente imposible. El valor consistente con el consumo específico de la Agencia de Protección Ambiental es de 528 g de CO_2 por caballo-hora. Por esta razón, la derivación del consumo se realiza a partir del consumo específico y no del factor de emisión publicado.

Para la variante eléctrica, el consumo se obtiene del trabajo mecánico requerido, idéntico al de la versión diésel, por tratarse de la misma tarea sobre la misma plataforma y corregido por el rendimiento de la cadena de tracción eléctrica, que se estima en 90% considerando las pérdidas del convertidor, del motor y de la transmisión:

$$\textit{Consumo (kWh/h)} = \textit{Potencia (kW)} \times \textit{Factor de carga} \div \textit{Rendimiento de la cadena eléctrica}$$

El BISON E 620 desarrolla 115 kW. La Tabla 14 presenta el consumo resultante para ambas tecnologías y el costo energético horario asociado, calculado con un precio del petróleo diésel de $1.500 por litro y una tarifa eléctrica de $140 por kWh, conforme a los valores establecidos en el apartado 2.2.4.

Factor de carga	Consumo diésel (L/h)	Costo diésel ($/h)	Consumo eléctrico (kWh/h)	Costo eléctrico ($/h)	Ahorro ($/h)
0,22 — cota inferior	6,70	10.043	28,1	3.936	6.107
0,40 — caso base	12,17	18.260	51,1	7.156	11.104
0,55 — cota superior	16,74	25.108	70,3	9.839	15.269

Tabla 14: Consumo y costo energético horario según factor de carga
Fuente: elaboración propia. Factor de carga según Sznajderman et al. (2022); consumo específico según US EPA NONROAD. Precios de energía según el apartado 2.2.4.

El resultado más relevante de la Tabla 14 es que la relación entre ambos costos se mantiene constante con independencia del factor de carga: el costo energético de la alternativa eléctrica equivale al 39% del correspondiente a la variante diésel en los tres escenarios. Ello se explica

porque el factor de carga afecta proporcionalmente a ambas tecnologías, de modo que no altera la relación entre ellas sino únicamente la magnitud absoluta del ahorro.

Esta constatación tiene una consecuencia metodológica relevante. La incertidumbre sobre el factor de carga no compromete la conclusión respecto de cuál tecnología resulta más económica en operación, sino solamente la cuantía del ahorro y, con ello, el plazo en que dicho ahorro compensa la mayor inversión inicial.

Combinando el caso base de ambos parámetros, el factor de utilización de 21% y factor de carga de 0,40 se obtienen 1.840 horas efectivas de operación al año, equivalentes a un consumo anual de 22.394 litros de petróleo diésel o de 94.024 kilovatios-hora de energía eléctrica, según la tecnología. El ahorro energético anual resultante asciende a $20,4 millones, cifra que constituye el segundo insumo del modelo de costo global desarrollado en el apartado 3.4.

3.3. Proyección de los precios de la energía

La evaluación se extiende sobre un horizonte de diez años, por lo que mantener constantes los precios de la energía durante todo el período introduciría un sesgo sistemático en el resultado. Ambos precios se proyectan a continuación, si bien mediante procedimientos distintos: la formación del precio del petróleo diésel responde al mercado internacional y admite el tratamiento estadístico descrito en el apartado 2.2.5, mientras que la tarifa eléctrica chilena se encuentra determinada, durante el horizonte de evaluación, por un calendario regulatorio establecido por ley.

a) Precio del petróleo diésel. Se aplica regresión lineal simple sobre la serie de precios promedio anuales presentada en el Gráfico 5, correspondiente al período 2016–2026. Tomando como variable independiente el número de años transcurridos desde 2016, el ajuste por mínimos cuadrados entrega la siguiente expresión:

$$\textit{Precio diésel (CLP/L)} = 390{,}0 + 87{,}8 \times t$$

donde t corresponde al número de años contados desde 2016. La pendiente indica un incremento promedio de $87,8 por litro cada año, y el coeficiente de determinación alcanza un valor de $R^2 = 0{,}899$, de modo que la tendencia lineal explica cerca del 90% de la variabilidad observada en el período. El ajuste es, por tanto, estadísticamente aceptable para los fines de proyección de este estudio.

Corresponde advertir, sin embargo, que el valor que entrega la recta para el año 2026 es de $1.268 por litro, inferior al precio promedio observado ese año, de $1.420 por litro, y a los $1.500 por litro empleados en el cálculo del costo energético horario del apartado 3.2.2. La regresión pondera por igual todo el período 2016–2026 y no recoge el alza reciente asociada a la modificación del Mecanismo de Estabilización de Precios de los Combustibles descrita en el apartado 2.1.7, de modo que proyectar desde ese valor subestimaría el costo del combustible desde el primer año del horizonte. Por esta razón se conserva la pendiente de la regresión, que representa la tendencia de largo plazo, y se ajusta el intercepto para que la recta pase por el precio observado en 2026:

$$\textit{Precio diésel (CLP/L)} = 541{,}8 + 87{,}8 \times t$$

De este modo, la proyección parte del nivel de precio vigente y mantiene el ritmo de crecimiento histórico de $87,8 por litro al año. La recta sin ajuste, que parte de $1.268 por litro, y el precio spot de $1.500 por litro se conservan como escenarios inferior y superior del análisis de sensibilidad del apartado 3.6.

b) Tarifa eléctrica. La serie histórica de la tarifa eléctrica regulada no admite el mismo tratamiento. Entre octubre de 2019 y julio de 2024 los componentes de generación y distribución, cerca del 90% de la cuenta final permanecieron congelados por mandato legal, primero mediante la Ley N° 21.185, que estableció el Mecanismo de Precios Estabilizados al Cliente, y luego mediante la Ley N° 21.194, que congeló el Valor Agregado de Distribución (García Bernal, 2024). La serie observada durante ese período no refleja el costo subyacente del suministro, sino una decisión regulatoria, por lo que extrapolarla mediante regresión proyectaría hacia el futuro un artefacto normativo y no una tendencia económica.

En contrapartida, la trayectoria de la tarifa durante el horizonte de evaluación se encuentra en buena medida determinada por la Ley N° 21.667 de abril de 2024, que estableció el calendario de amortización de la deuda acumulada con las empresas generadoras, cercana a los USD 5.500 millones. Dicha ley fija un cargo de $22 por kilovatio-hora vigente hasta diciembre de 2027 y un cargo de $9 por kilovatio-hora entre diciembre de 2027 y diciembre de 2035, fecha en la cual la deuda queda saldada y el cargo se extingue (García, 2024). Esta información permite construir una proyección de base normativa, más precisa que cualquier extrapolación estadística.

En consecuencia, la tarifa se descompone en dos términos. El componente de suministro se obtiene restando el cargo vigente al valor de $140 por kilovatio-hora adoptado en el apartado 2.2.4, lo que

arroja $118 por kilovatio-hora para el año base, y se proyecta a una tasa de 3% anual, correspondiente a la meta de inflación del Banco Central de Chile. A dicho componente se le suma el cargo de amortización según el calendario legal. El resultado presenta dos escalones descendentes: uno en 2028, cuando el cargo se reduce de $22 a $9, y otro en 2036, cuando se extingue.

La Tabla 15 presenta ambas proyecciones para los diez años del horizonte de evaluación.

Año	Año de evaluación	Precio diésel ($/L)	Tarifa eléctrica ($/kWh)
2027	1	1.508	143,5
2028	2	1.596	134,2
2029	3	1.683	137,9
2030	4	1.771	141,8
2031	5	1.859	145,8
2032	6	1.947	149,9
2033	7	2.035	154,1
2034	8	2.123	158,5
2035	9	2.210	163,0
2036	10	2.298	158,6

Tabla 15: Proyección de los precios de la energía, 2027-2036
Fuente: elaboración propia. Diésel: regresión lineal sobre la serie CNE 2016–2026, con intercepto ajustado al precio observado de 2026. Electricidad: componente de suministro proyectado al 3% anual más cargo de amortización de la Ley N° 21.667.

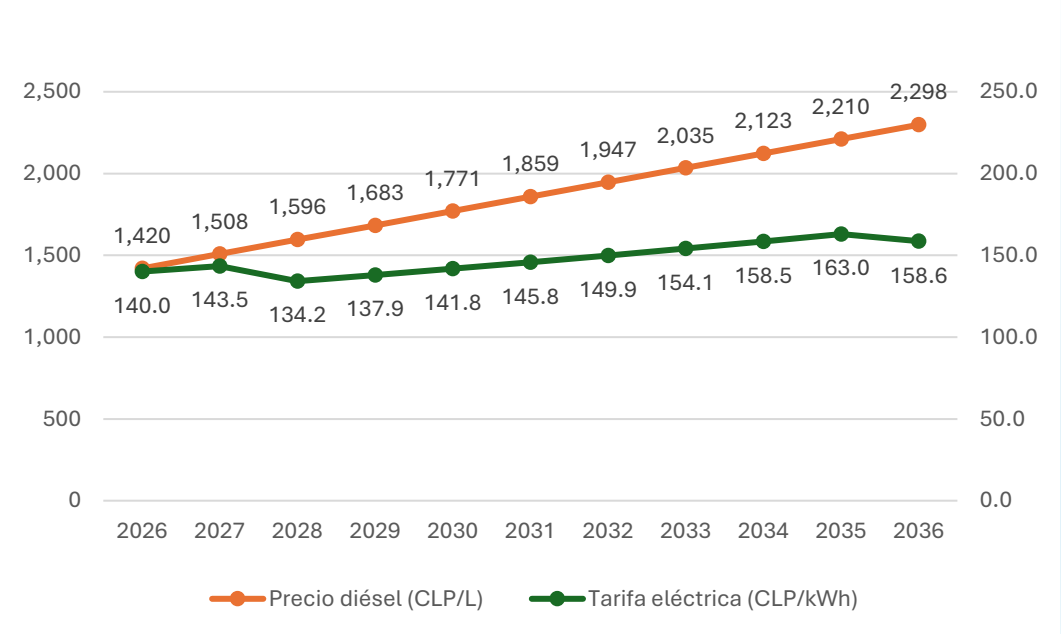


Gráfico 8: Trayectoria proyectada de los precios de la energía (2026–2036)
Fuente: elaboración propia. Diésel: regresión lineal sobre la serie CNE 2016–2026, con intercepto ajustado al precio observado de 2026. Electricidad: componente de suministro proyectado a la inflación esperada más el cargo de la Ley N° 21.667 (BCN, 2024).

El Gráfico 8 representa ambas trayectorias. La divergencia entre ellas es el resultado más relevante de este apartado. A lo largo del horizonte el precio del petróleo diésel se incrementa un 52%, mientras que la tarifa eléctrica lo hace solamente un 11%. Ello implica que la ventaja operacional de la alternativa eléctrica no es constante, sino creciente: el ahorro por hora de operación aumenta año tras año, de modo que la evaluación basada en precios constantes subestimaría el beneficio del reemplazo.

Deben declararse las limitaciones de ambas proyecciones. La regresión aplicada al combustible asume que la tendencia histórica se mantiene, supuesto que no captura shocks geopolíticos, variaciones del tipo de cambio ni nuevas modificaciones al Mecanismo de Estabilización de Precios de los Combustibles; la volatilidad observada durante 2026, con variaciones superiores al 50% en menos de seis meses, ilustra la magnitud de este riesgo. La proyección tarifaria, por su parte, supone que el calendario de amortización se cumple según lo legislado y no incorpora los resultados de los futuros procesos de fijación de precio de nudo ni del Valor Agregado de Distribución, que se revisan cada cuatro años. Ambas proyecciones se someten a sensibilidad en el apartado 3.6.

Corresponde señalar, además, que el valor de $140 por kilovatio-hora proviene de la tarifa BT1 aplicable a clientes residenciales y pequeños comercios. Una empresa de servicios en tierra que instale un punto de carga de 70 kilovatios en el recinto aeroportuario quedaría sujeta a una tarifa de mayor potencia conectada, con estructura de cargos distinta. La verificación de la tarifa efectivamente aplicable constituye una precisión pendiente del estudio.

3.4. Modelo de costo global

Establecidos la inversión inicial, el régimen de operación y la trayectoria de los precios de la energía, corresponde integrarlos en el modelo de costo global descrito en el apartado 2.2.6. La evaluación se estructura sobre un horizonte de diez años: la inversión se sitúa en el período cero, correspondiente al año 2026, y los flujos operacionales se extienden entre los años 1 y 10, equivalentes al período 2027-2036.

Los flujos se expresan en términos nominales, de manera consistente con las proyecciones del apartado anterior, que incorporan la inflación esperada. Por esta razón la tasa de descuento debe

ser igualmente nominal. Se adopta un valor de 10% anual, equivalente a una tasa real cercana al 6,8% bajo la meta de inflación de 3%, coherente con el costo de capital exigible a un operador privado de servicios en tierra. Las tasas de 8% y 12% se incorporan al análisis de sensibilidad del apartado 3.6.

3.4.1. Costos operacionales anuales

Los consumos anuales corresponden a los determinados en el apartado 3.2.2 para el caso base, esto es, 1.840 horas efectivas de operación al año con un factor de carga de 0,40: 22.394 litros de petróleo diésel para la variante de combustión y 94.024 kilovatios-hora para la variante eléctrica. El costo operacional anual de cada alternativa se obtiene multiplicando dichos consumos por el precio proyectado del año correspondiente.

Año	Costo diésel (MM$)	Costo eléctrico (MM$)	Ahorro anual (MM$)
2027	33,8	13,5	20,3
2028	35,7	12,6	23,1
2029	37,7	13,0	24,7
2030	39,7	13,3	26,3
2031	41,6	13,7	27,9
2032	43,6	14,1	29,5
2033	45,6	14,5	31,1
2034	47,5	14,9	32,6
2035	49,5	15,3	34,2
2036	51,5	14,9	36,6
Total sin descontar	**426,2**	**139,8**	**286,3**

Tabla 16: Costos operacionales anuales y ahorro proyectado
Fuente: elaboración propia a partir de los consumos del apartado 3.2.2 y las proyecciones de precios del apartado 3.3.

El ahorro operacional anual crece desde $20,3 millones en el primer año hasta $36,6 millones en el décimo, acumulando $286,3 millones sin descontar a lo largo del horizonte. La cifra del primer año es coherente con los $20,4 millones señalados en el apartado 3.2.2, calculados con el precio spot de $1.500 por litro: al partir del precio observado de 2026, la proyección sitúa el diésel de 2027 en $1.508 por litro, prácticamente el mismo nivel.

El modelo no incorpora un diferencial de costos de mantenimiento. La razón es que no se dispone de registros de la operación local ni de cotizaciones de servicio para ninguna de las dos variantes,

y estimar dicho diferencial a partir de supuestos introduciría una incertidumbre mayor que la que resolvería. Esta omisión es conservadora: la literatura sobre equipos de apoyo en tierra eléctricos documenta de manera consistente menores costos de mantenimiento, atribuidos a la ausencia de cambios de aceite, filtros y correas, y a un menor número de piezas móviles sometidas a desgaste. Al excluir este componente, el modelo subestima el beneficio de la alternativa eléctrica, de modo que un resultado favorable obtenido bajo este supuesto se mantendría al incorporarlo.

3.4.2. Reemplazo de baterías y valor residual

La batería constituye el componente de mayor costo de la alternativa eléctrica y presenta una vida útil sustancialmente inferior a la del equipo, por lo que su reemplazo debe incorporarse explícitamente al flujo. Se considera la configuración de 160 kilovatios-hora del BISON E 620, que es la de mayor capacidad ofrecida por el fabricante.

El consumo anual de 94.024 kilovatios-hora equivale a 588 ciclos completos equivalentes sobre una batería de 160 kilovatios-hora. Adoptando una vida útil de 3.000 ciclos hasta alcanzar el 80% del estado de salud, valor habitualmente declarado para baterías de ion-litio de aplicación industrial, la batería alcanza el límite a los 5,1 años de operación. Se programa en consecuencia un reemplazo único en el año 6 del horizonte; la batería instalada en dicho año alcanzaría su propio límite recién en el año 11, fuera del período de evaluación.

Un aspecto operacional merece señalarse, y en el BISON 620 resulta más exigente que en los modelos de menor potencia. Las 1.840 horas anuales distribuidas sobre trescientos sesenta y cinco días equivalen a 5,0 horas diarias de operación efectiva, con un consumo de 258 kilovatios-hora por día. Dicho valor supera en un 61% la capacidad instalada de 160 kilovatios-hora, de modo que el equipo requiere al menos una recarga intermedia durante la jornada. El cargador integrado de 70 kilovatios en corriente continua permite reponer el déficit de 98 kilovatios-hora en aproximadamente una hora y veinticinco minutos.

La restricción es manejable porque el equipo permanece inactivo el 79% del tiempo y porque el itinerario de vuelos se conoce con antelación, lo que permite programar la recarga en las ventanas de menor demanda. Alruwaili y Cipcigan (2022) desarrollan precisamente esta propiedad al modelar la operación horaria de una flota de equipos de apoyo en tierra eléctricos, y muestran que su disponibilidad queda determinada por la programación de vuelos y no por el comportamiento del usuario, a diferencia de lo que ocurre con los vehículos eléctricos de carretera. Bajo el escenario

de factor de carga 0,22 la restricción se atenúa considerablemente, con un consumo diario de 142 kilovatios-hora, inferior a la capacidad instalada.

El precio de la batería de reemplazo no ha sido cotizado. Como referencia, la encuesta anual de BloombergNEF sitúa el precio medio del pack de ion-litio en USD 108 por kilovatio-hora durante 2025, con USD 128 por kilovatio-hora para la química de níquel-manganeso-cobalto (BloombergNEF, 2025). Dichos valores corresponden al mercado automotriz de alto volumen, por lo que no son directamente aplicables a un repuesto de fabricante para un equipo de baja serie. Se adopta un valor de USD 200 por kilovatio-hora instalado, que duplica holgadamente la referencia de mercado para cubrir el margen del fabricante, el recambio y la instalación, con un rango de USD 150 a 250 por kilovatio-hora que se traslada al análisis de sensibilidad.

Los valores residuales al término del horizonte se determinan por depreciación lineal sobre la vida útil de cada componente. El chasis se valoriza en un 25% de la inversión en el equipo, porcentaje aplicable por igual a ambas alternativas y, por tanto, proporcional a la diferencia de precio entre ellas. La batería instalada en el año 6 registra cuatro años de uso sobre una vida de 5,1 años al término de la evaluación, lo que arroja un valor remanente del 22%. La infraestructura de carga se deprecia sobre una vida útil de veinte años, de modo que conserva el 50% de su valor al año 10.

Componente	**Año**	**Monto (MM$)**	**Criterio**
Reemplazo de batería (160 kWh)	6	32,0	160 kWh × USD 200/kWh
Valor residual de la batería	10	6,9	22% remanente de 5,1 años de vida
Valor residual de la infraestructura	10	15,0	50% sobre vida útil de 20 años
Valor residual del chasis	10	25% de la inversión	Proporcional al precio del equipo

Tabla 17: Reemplazo de batería y valores residuales
Fuente: elaboración propia. Precio de referencia del pack según BloombergNEF (2025); tipo de cambio 1 USD = 1.000 CLP conforme al apartado 3.1.3.

Los tres primeros componentes de la Tabla 17 son montos absolutos, independientes del precio del tractor. El cuarto, en cambio, es proporcional a dicho precio y se incorpora de manera algebraica en el apartado siguiente, lo que permite mantener el carácter independiente del precio que caracteriza al resultado del modelo.

3.4.3. Flujo de costos y valor presente

Los flujos determinados en los apartados anteriores se llevan a valor presente mediante el factor de actualización definido en el apartado 2.2.6, con una tasa de descuento nominal de 10% anual:

$$Factor\ de\ descuento = 1 \div (1 + 0{,}10)^{n}$$

La Tabla 18 presenta el ahorro operacional anual, el factor correspondiente a cada período y su valor presente.

Año de evaluación	Ahorro anual (MM$)	Factor de descuento	Valor presente (MM$)
1	20,3	0,9091	18,43
2	23,1	0,8264	19,10
3	24,7	0,7513	18,58
4	26,3	0,6830	17,99
5	27,9	0,6209	17,34
6	29,5	0,5645	16,65
7	31,1	0,5132	15,95
8	32,6	0,4665	15,22
9	34,2	0,4241	14,49
10	36,6	0,3855	14,09
Valor presente del ahorro operacional			**167,8**

Tabla 18: Valor presente del ahorro operacional
Fuente: elaboración propia. Tasa de descuento nominal de 10% anual.

El ahorro operacional acumulado en valor presente asciende a $167,8 millones. A dicha magnitud deben descontarse el reemplazo de la batería del año 6, cuyo valor presente es de $18,1 millones, y sumarse los valores residuales de la batería y de la infraestructura de carga, que en conjunto ascienden a $21,9 millones nominales y a $8,5 millones en valor presente.

Con estos elementos se resuelve la condición de indiferencia definida en el apartado 2.2.6. Denominando Δp a la diferencia de precio en origen entre ambos tractores, la inversión incremental de la alternativa eléctrica queda expresada como:

$$\Delta\ Inversión = \Delta p \times 1{,}3447 + \$30{,}0\ millones$$

donde el factor 1,3447 corresponde al producto entre el recargo de flete e internación (13%) y el impuesto al valor agregado (19%) determinados en el apartado 3.1.3, y los $30,0 millones a la

infraestructura de carga. La condición de indiferencia establece que el ahorro operacional descontado, neto del reemplazo de batería y corregido por el diferencial de valor residual, iguale a dicha inversión incremental:

$$VP(\text{ahorro}) - VP(\text{reemplazo}) + VP(\text{valor residual diferencial}) = \Delta\ \text{Inversión}$$

Reemplazando los valores obtenidos e incorporando el valor residual del chasis como el 25% de la inversión incremental en el equipo, se despeja el umbral buscado:

$$\Delta p \leq [167{,}8 - 18{,}1 + 8{,}5 - 30{,}0] \div [1{,}3447 \times (1 - 0{,}25 \times 0{,}3855)] = 128{,}2 \div 1{,}2151$$

$$\text{Sobreprecio máximo admisible} = \$105{,}5\ \text{millones} \approx \text{USD}\ 105.500$$

El resultado indica que la alternativa eléctrica resulta económicamente conveniente siempre que su precio en origen no exceda en más de USD 105.500 al del equipo diésel equivalente. Debe subrayarse que este umbral se obtuvo sin conocer el precio de compra de ninguno de los dos tractores, que es precisamente la ventaja metodológica anticipada en el apartado 2.2.6: el criterio de decisión queda establecido de manera independiente de la información comercial no disponible.

El umbral es sensible al régimen de operación. Repitiendo el cálculo con las cotas del factor de carga establecidas en el apartado 3.2.2, el sobreprecio máximo admisible se sitúa en USD 56.000 bajo el escenario de 0,22 y en USD 144.400 bajo el de 0,55. El rango resultante es amplio y refleja la incertidumbre sobre el régimen de carga del motor, razón por la cual el apartado 3.6 somete este parámetro a un análisis de sensibilidad específico.

Conviene además dejar constancia de un efecto de escala. El umbral obtenido para el »BISON« 620 casi duplica el que arrojaría un tractor de la mitad de potencia, y la razón es estructural: el ahorro operacional crece de manera aproximadamente proporcional a la potencia instalada, puesto que el costo energético de la alternativa eléctrica se mantiene en el 39% del correspondiente a la diésel con independencia del tamaño del equipo, mientras que el sobreprecio de electrificación se comporta como un monto absoluto aproximadamente fijo, según se estableció en el apartado 3.1.2. En consecuencia, cuanto mayor es el equipo, más favorable resulta la electrificación.

La comparación de este umbral con los escenarios de precio y las razones de sobreprecio establecidos en el apartado 3.1 se desarrolla en el apartado siguiente.

3.5. Comparación de resultados y criterio de decisión

El apartado anterior estableció que la alternativa eléctrica resulta conveniente mientras su precio en origen no exceda en más de USD 105.500 al del equipo diésel equivalente. Corresponde ahora contrastar ese umbral con los sobreprecios que efectivamente implican los escenarios de precio y las razones de electrificación establecidos en el apartado 3.1.

La comparación se expresa mediante dos indicadores. El primero es la holgura, definida como el cociente entre el umbral admisible y el sobreprecio requerido: valores superiores a la unidad indican conveniencia económica y su magnitud expresa el margen disponible. El segundo es el plazo de recuperación descontado, entendido como el número de años que transcurre hasta que el ahorro operacional acumulado en valor presente, neto del reemplazo de batería, iguala al diferencial de inversión inicial determinado en el apartado 3.1.3.

Escenario	Razón	Sobreprecio requerido (USD)	Umbral admisible (USD)	Holgura	Plazo de recuperación descontado
E1 — Bajo	1,12	12.000	105.500	8,8	2,5 años
E2 — Medio	1,12	24.000	105.500	4,4	3,3 años
E3 — Alto	1,12	36.000	105.500	2,9	4,2 años
E1 — Bajo	1,31	31.000	105.500	3,4	3,9 años
E2 — Medio	1,31	62.000	105.500	1,7	7,5 años
E3 — Alto	1,31	93.000	105.500	1,1	10 años (con residuales)

Tabla 19: Comparación del sobreprecio requerido con el umbral admisible
Fuente: elaboración propia. Sobreprecios requeridos según la Tabla 11; umbral según el apartado 3.4.3. El plazo de recuperación descuenta los flujos al 10% anual e incorpora el reemplazo de batería del año 6. En el escenario E3 con razón 1,31 la inversión incremental se recupera al término del horizonte, al incorporar los valores residuales.

Bajo la razón de sobreprecio adoptada como caso base, el reemplazo resulta económicamente conveniente en los tres escenarios de precio, con holguras que van de 2,9 a 8,8 veces y plazos de recuperación comprendidos entre dos años y medio y cuatro años y tres meses, es decir, dentro de la primera mitad del horizonte de evaluación. La conclusión no depende, por tanto, del escenario de precio que finalmente se verifique.

Bajo la razón conservadora el resultado se estrecha, pero se mantiene favorable. Los escenarios bajo y medio son convenientes, aunque el segundo requiere siete años y medio para recuperar la inversión incremental. El escenario alto, que combina el precio más alto del equipo con la razón de electrificación más elevada, resulta conveniente por un margen estrecho: el sobreprecio requerido

de USD 93.000 queda un 12% por debajo del umbral admisible, y la inversión incremental se recupera recién al término del horizonte, una vez considerados los valores residuales del equipo, de la batería y de la infraestructura de carga. Se trata de la combinación más desfavorable entre las consideradas y, aun en ella, el reemplazo no genera pérdida.

Una lectura complementaria se obtiene invirtiendo el cálculo. Manteniendo la razón de 1,12, el precio del tractor diésel tendría que superar los USD 879.000 para que el sobreprecio resultante excediera el umbral; con la razón de 1,31, el límite se sitúa en USD 340.000. El primero de esos valores está muy por encima de cualquier precio plausible para un tractor de esta clase, y el segundo supera incluso el escenario de precio más alto considerado.

Conviene además contrastar el umbral con la evidencia del sobreprecio absoluto desarrollada en el apartado 3.1.2. Tanto el incremento de USD 14.000 documentado por Sari et al. (2022) para el conjunto de equipos de apoyo en tierra como el de USD 15.800 observado entre las dos variantes de la Toyota Hilux se sitúan por debajo de la sexta parte del umbral admisible. Si el sobreprecio de electrificación se comporta efectivamente como un monto fijo y no como un porcentaje, la conveniencia del reemplazo resulta holgada en cualquier escenario de precio.

El criterio de decisión que se desprende del análisis puede enunciarse de manera operativa: recibida la cotización de ambos equipos, corresponde comparar la diferencia de precio en origen contra el umbral de USD 105.500. Si dicha diferencia es menor, el reemplazo se justifica económicamente dentro del horizonte de diez años; si es mayor, no. La regla es directamente verificable por el operador y no requiere reconstruir el modelo. Su robustez frente a variaciones de los parámetros se examina en el apartado siguiente.

3.6. Análisis de sensibilidad

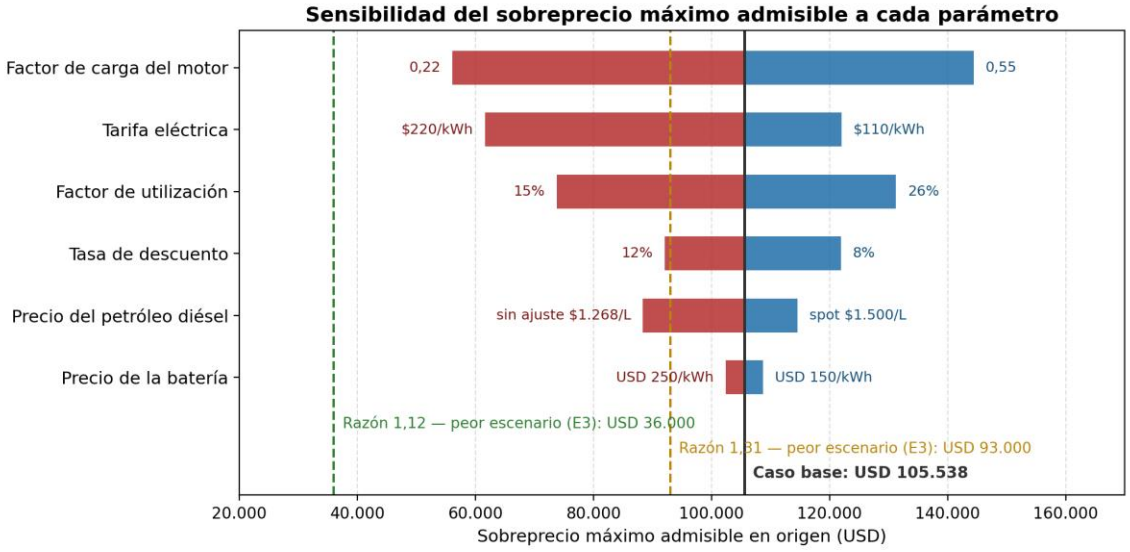
El umbral determinado en el apartado 3.4.3 descansa sobre seis parámetros cuya magnitud no proviene de cotizaciones ni de registros de la operación local. Para establecer la robustez de la conclusión se recalcula el modelo completo modificando cada parámetro por separado y manteniendo los restantes en su valor base. El procedimiento es univariante y deliberadamente conservador en su lectura: no asigna probabilidades a los valores extremos, sino que delimita el intervalo dentro del cual se mueve el resultado.

Corresponde señalar una particularidad del procedimiento. La vida útil de la batería no es un dato independiente, sino una función del consumo anual, de modo que se recalcula en cada escenario. En los casos de mayor consumo, el factor de carga de 0,55 y factor de utilización de 26% de la batería alcanza su límite en menos de cinco años y el modelo incorpora un segundo reemplazo dentro del horizonte, lo que atenúa el beneficio que de otro modo arrojarían esos escenarios.

La Tabla 20 presenta los resultados y el Gráfico 9 los ordena según su incidencia.

Parámetro modificado	**Valor**	**Umbral admisible (USD)**	**Variación**
Caso base	—	**105.500**	—
Factor de carga del motor	0,22	56.000	−47%
Factor de carga del motor	0,55	144.400	+37%
Tarifa eléctrica	$220/kWh	61.600	−42%
Tarifa eléctrica	$110/kWh	122.000	+16%
Factor de utilización	15%	73.800	−30%
Factor de utilización	26%	131.300	+24%
Precio del petróleo diésel	Sin ajuste $1.268/L	88.300	−16%
Precio del petróleo diésel	Spot $1.500/L	114.600	+9%
Tasa de descuento	12%	92.100	−13%
Tasa de descuento	8%	121.900	+16%
Precio de la batería	USD 250/kWh	102.400	−3%
Precio de la batería	USD 150/kWh	108.700	+3%

Tabla 20: Sensibilidad univariante del sobreprecio máximo admisible
Fuente: elaboración propia. Cada fila modifica un solo parámetro manteniendo los restantes en su valor base.



Fuente: elaboración propia. Cada barra modifica un solo parámetro manteniendo el resto en su valor base. La vida de la batería se recalcula en cada escenario, por lo que los casos de mayor consumo incorporan un segundo reemplazo dentro del horizonte.

Gráfico 9: Sensibilidad del sobreprecio máximo admisible a cada parámetro

El ordenamiento por incidencia arroja un resultado contraintuitivo que merece destacarse. El precio de la batería, que constituye el dato que con mayor urgencia debe solicitarse al fabricante, es el parámetro de menor influencia sobre el resultado: duplicar su valor de referencia desplaza el umbral en apenas un 3%. La razón es que el reemplazo ocurre en el año 6 y su efecto queda parcialmente compensado por el mayor valor residual de la batería instalada. La incertidumbre comercial sobre este componente, por tanto, no compromete la conclusión.

Los parámetros dominantes son el factor de carga del motor y la tarifa eléctrica, seguidos por el factor de utilización. Los tres comparten una característica: ninguno proviene de la operación del Aeropuerto Arturo Merino Benítez, sino de la literatura o de tarifas residenciales. Esto confirma que el esfuerzo de levantamiento de información debe concentrarse en medir el régimen de trabajo efectivo de la flota y en obtener la tarifa eléctrica aplicable al recinto aeroportuario, antes que en refinar los costos de los componentes.

El dato decisivo del análisis es el valor mínimo del intervalo. El escenario univariante más desfavorable corresponde a un factor de carga del motor de 0,22 y arroja un umbral de USD 56.000. Dicho valor sigue siendo superior al sobreprecio requerido en los tres escenarios de precio bajo la razón de 1,12, de USD 12.000, 24.000 y 36.000, y también al de USD 31.000 correspondiente al escenario bajo con la razón conservadora. Del mismo modo, si se emplea la recta de regresión sin ajuste, que parte de $1.268 por litro, el umbral desciende a USD 88.300 y la conveniencia se mantiene en cinco de los seis escenarios. Es decir, ninguna variación individual de un parámetro revierte la conclusión del caso base.

Para delimitar el extremo se construyeron además dos escenarios combinados. El pesimista adopta simultáneamente el factor de carga de 0,22, el factor de utilización de 15%, la tasa de descuento de 12%, la tarifa de $220 por kilovatio-hora y el precio de batería de USD 250 por kilovatio-hora; el umbral resultante cae a USD 12.700, por debajo del sobreprecio requerido incluso en el escenario de precio más bajo. El optimista, construido con los valores opuestos, eleva el umbral a USD 244.200. La amplitud del intervalo refleja que la conclusión no es incondicional: exige que el régimen de trabajo y la tarifa eléctrica se sitúen en rangos razonables, no en el extremo adverso de todos ellos a la vez.

En síntesis, el reemplazo resulta económicamente conveniente en todos los escenarios de precio bajo la razón de sobreprecio adoptada, y esa conclusión se mantiene ante la variación individual de

cualquiera de los seis parámetros examinados. Deja de sostenerse únicamente si varios de ellos adoptan de forma simultánea su valor más desfavorable, situación que la medición de los parámetros operacionales locales permitiría descartar o confirmar.

3.7. Escalamiento, limitaciones y alternativas

Los resultados de los apartados anteriores corresponden a la evaluación de una unidad aislada. Este apartado examina cómo se modifican al extender el análisis a una flota y a equipos de otra capacidad, declara las limitaciones que acotan el alcance de las conclusiones y expone las alternativas que el estudio no desarrolló.

Escalamiento a una flota. El único componente de la inversión que no escala con el número de equipos es la infraestructura de carga. La obra eléctrica de alimentación dimensionada para 70 kilovatios atiende a un tractor a la vez, pero el equipo permanece inactivo el 79% del tiempo, de modo que un mismo punto de conexión puede servir a varias unidades mediante programación horaria. La Tabla 21 recalcula el umbral prorrateando dicho componente.

Equipos por punto de carga	Infraestructura por unidad (MM$)	Umbral admisible (USD)	Variación
1 (caso base)	30,0	105.500	—
2	15,0	115.500	+9%
3	10,0	118.800	+13%
4	7,5	120.500	+14%

Tabla 21: Efecto del prorrateo de la infraestructura de carga
Fuente: elaboración propia. Se mantiene el resto de los parámetros en su valor base.

El efecto es relevante pero presenta rendimientos decrecientes: dos tercios de la mejora se obtiene al pasar de uno a dos equipos. Debe además reconocerse un límite físico. Cada tractor requiere aproximadamente una hora y veinticinco minutos de recarga intermedia durante la jornada, más la reposición completa fuera de turno; con esas exigencias un punto de 70 kilovatios atiende de manera realista a dos o tres unidades, de modo que las filas correspondientes a cuatro equipos exigirían un segundo punto de conexión y el prorrateo dejaría de ser lineal. La determinación del número óptimo de equipos por cargador constituye un problema de programación de operaciones que excede el alcance de esta memoria.

Escalamiento por capacidad del equipo. Aplicando el mismo modelo al »BISON« 370, de 150 toneladas de peso máximo de despegue admisible y 75 kilovatios de potencia, el umbral desciende

a USD 64.800 frente a los USD 105.500 del »BISON« 620. La razón entre ambos umbrales es de 1,63 y la razón entre las potencias instaladas de 1,55: el umbral escala de manera aproximadamente proporcional a la potencia. Ello confirma la regularidad señalada en el apartado 3.4.3, según la cual el ahorro operacional crece con el tamaño del equipo mientras el sobreprecio de electrificación se mantiene como un monto absoluto aproximadamente fijo.

Esta conclusión tiene, sin embargo, un techo que conviene declarar. Las fichas técnicas consultadas del fabricante ofrecen versión eléctrica únicamente hasta el modelo 620, de 250 toneladas de peso máximo de despegue admisible. Los modelos 1000 y 1500, destinados a aeronaves de 400 y 600 toneladas, se ofrecen solo en versión diésel. En consecuencia, una conversión completa de la flota de tractores de un aeropuerto que opere aeronaves de fuselaje ancho de mayor porte no resulta factible con el catálogo actual de este fabricante, y el segmento más pesado permanecería necesariamente en tecnología de combustión.

Limitaciones del estudio. Deben declararse siete restricciones que acotan el alcance de los resultados.

1. El factor de utilización efectiva y el factor de carga del motor se adoptaron de la literatura internacional y no de mediciones sobre la flota del Aeropuerto Arturo Merino Benítez. El análisis de sensibilidad mostró que son los dos parámetros de mayor incidencia sobre el resultado.

2. La tarifa eléctrica empleada corresponde a la modalidad BT1, aplicable a clientes residenciales y pequeños comercios. Un punto de carga de 70 kilovatios en el recinto aeroportuario queda sujeto a una tarifa de mayor potencia conectada, con estructura de cargos distinta.

3. El modelo no cuantifica el diferencial de costos de mantenimiento, por no disponerse de registros ni de cotizaciones de servicio. La omisión es conservadora, puesto que la literatura documenta de manera consistente menores costos de mantenimiento en equipos eléctricos; su incorporación solo podría mejorar el resultado.

4. El precio del paquete de baterías de reemplazo constituye un supuesto y no una cotización, si bien el análisis de sensibilidad estableció que es el parámetro de menor incidencia sobre el umbral.

5. La serie de precios del petróleo diésel empleada en la regresión tiene carácter referencial y requiere ser sustituida por la serie oficial publicada por la Comisión Nacional de Energía antes de una decisión de inversión.

6. El tipo de cambio se fijó por supuesto metodológico en 1.000 pesos por dólar, valor cercano pero no idéntico al observado, con el propósito de facilitar la reconstrucción de los cálculos.

7. La evaluación se realiza sobre una unidad y no considera el efecto de la recarga sobre la disponibilidad de la flota. Timmermans et al. (2025) documentan que la transición a equipos eléctricos puede requerir unidades adicionales para sostener el mismo nivel de servicio, costo que este estudio no incorpora.

Alternativas no desarrolladas. Cuatro caminos quedan abiertos para trabajos posteriores. El primero es el reemplazo gradual de la flota en lugar de la adquisición de una unidad aislada, que permitiría prorratear la infraestructura y negociar condiciones de compra por volumen. El segundo es la evaluación de modalidades de financiamiento distintas de la compra directa, como el arriendo operativo, que modifican el perfil temporal de los flujos sin alterar el costo global. El tercero es la cuantificación del beneficio ambiental en términos monetarios, que requiere el factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional y un precio de referencia del carbono. El cuarto es la provisión de servicios auxiliares a la red mediante carga bidireccional, línea que Alruwaili y Cipcigan (2022) desarrollan y que constituiría una fuente de ingreso adicional para el equipo eléctrico; su aplicación en Chile depende de una habilitación regulatoria que hoy no existe para clientes de este tipo.

3.8. Síntesis de resultados

La Tabla 22 reúne los resultados cuantitativos obtenidos a lo largo del capítulo, con indicación del apartado en que fue determinado cada uno.

Magnitud	**Valor**	**Apartado**
Equipo evaluado	Goldhofer BISON D 620 / E 620 (250 t, 115 kW)	2.2.1
Razón de sobreprecio, caso base	1,12	2.2.3
Razón de sobreprecio, escenario conservador	1,31	2.2.3
Escenarios de precio del equipo diésel en origen	USD 100.000 / 200.000 / 300.000	3.1.1

Magnitud	Valor	Apartado
Inversión inicial total, alternativa diésel	$134,6 a $403,5 millones	3.1.3
Inversión inicial total, alternativa eléctrica	$180,7 a $481,9 millones	3.1.3
Diferencial de inversión inicial	$46,1 a $78,4 millones	3.1.3
Horas efectivas de operación al año	1.840 h	3.2.1
Consumo anual de petróleo diésel	22.394 L	3.2.2
Consumo anual de energía eléctrica	94.024 kWh	3.2.2
Costo energético eléctrico respecto del diésel	39%	3.2.2
Crecimiento del precio del diésel en el horizonte	+52%	3.3
Crecimiento de la tarifa eléctrica en el horizonte	+11%	3.3
Ahorro operacional anual	$20,3 a $36,6 millones	3.4.1
Vida útil de la batería	5,1 años (reemplazo en el año 6)	3.4.2
Valor presente del ahorro operacional	$167,8 millones	3.4.3
Sobreprecio máximo admisible en origen	USD 105.500	3.4.3
Plazo de recuperación descontado, razón 1,12	2,5 a 4,2 años	3.5
Escenarios convenientes de los seis evaluados	6 de 6	3.5
Umbral bajo la sensibilidad univariante	USD 56.000 a 144.400	3.6
Parámetro de mayor incidencia	Factor de carga del motor	3.6
Parámetro de menor incidencia	Precio de la batería (±4%)	3.6

Tabla 22: Síntesis de los resultados del Capítulo III
Fuente: elaboración propia.

Tres resultados concentran el aporte del capítulo. El primero es el sobreprecio máximo admisible de USD 105.500, que constituye el criterio de decisión propiamente tal y que se obtuvo sin conocer el precio de compra de ninguno de los dos equipos. El segundo es la constatación de que el costo energético de la alternativa eléctrica equivale al 39% del correspondiente a la variante diésel con independencia del régimen de carga del motor, de modo que la incertidumbre sobre ese parámetro afecta la cuantía del ahorro pero no el sentido de la comparación. El tercero es la divergencia entre las trayectorias de precio de ambos energéticos, que hace creciente el ahorro a lo largo del horizonte y que tiene su origen en una decisión regulatoria documentada, la extinción del cargo de amortización de la Ley N° 21.667 hacia el año 2035.

Frente a estos resultados, el capítulo identifica una restricción operacional que no es de naturaleza económica y que condiciona la factibilidad del reemplazo: el consumo diario de 258 kilovatios-hora supera en un 61% la capacidad instalada de la batería de mayor tamaño ofrecida por el fabricante, de modo que el equipo requiere necesariamente una recarga intermedia durante la jornada. Su viabilidad depende de la estructura del turno y debe verificarse con el operador antes de cualquier decisión de inversión.

Conclusión

El presente estudio se propuso evaluar la factibilidad económica y operacional del reemplazo de tractores Push-Back diésel por equipos eléctricos en el Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez, mediante un análisis comparativo de costo global en un horizonte de diez años. La respuesta obtenida es afirmativa bajo las condiciones evaluadas, y se expone a continuación distinguiendo cada uno de los objetivos específicos planteados.

Respecto del primer objetivo específico, la inversión inicial requerida para incorporar un tractor Push-Back eléctrico de clase fuselaje ancho, puesto en Chile y en condiciones de operar, se sitúa entre $180,7 y $481,9 millones según el escenario de precio del equipo, frente a un rango de $134,6 a $403,5 millones para su equivalente diésel. El diferencial, comprendido entre $46,1 y $78,4 millones, no se explica principalmente por el precio de compra del equipo: el sobreprecio en origen representa entre un 26% y un 46% de dicho diferencial, mientras que el resto proviene del impuesto

al valor agregado aplicado sobre un valor mayor y de la infraestructura de carga, que es un costo ajeno al equipo. Esta constatación es relevante para el operador, porque indica que negociar el precio del tractor tiene menos efecto sobre la decisión que compartir la infraestructura entre varias unidades.

Respecto del segundo objetivo específico, el costo operacional anual de la alternativa eléctrica resulta sistemáticamente inferior al de la diésel. El resultado más estable del estudio es que el costo energético eléctrico equivale al 39% del correspondiente a la variante de combustión, proporción que se mantiene con independencia del factor de carga del motor, puesto que dicho parámetro afecta a ambas tecnologías en la misma medida. En términos absolutos, el ahorro operacional anual crece desde $20,3 millones en el primer año hasta $36,6 millones en el décimo, impulsado por la divergencia entre las trayectorias de precio de ambos energéticos. A este ahorro debe descontarse el reemplazo del paquete de baterías, que el régimen de trabajo estimado sitúa en el año 6 del horizonte con un costo de $32 millones.

Este segundo objetivo se cumplió, sin embargo, de manera parcial. El diferencial de costos de mantenimiento no pudo cuantificarse por no disponerse de registros de la operación local ni de cotizaciones de servicio para ninguna de las dos variantes, y estimarlo a partir de supuestos habría introducido una incertidumbre mayor que la que resolvería. La omisión opera en contra de la alternativa eléctrica, dado que la literatura sobre equipos de apoyo en tierra documenta de manera consistente menores costos de mantenimiento en esta tecnología; en consecuencia, el resultado favorable obtenido constituye una cota inferior del beneficio real.

Respecto del tercer objetivo específico, el sobreprecio máximo admisible del tractor eléctrico asciende a USD 105.500 sobre el precio en origen de su equivalente diésel. Este valor constituye el aporte metodológico central de la memoria, y su interés radica en que se obtiene sin conocer el precio de compra de ninguno de los dos equipos. Habiéndose establecido que los fabricantes de tractores de remolque no publican precios y los comercializan exclusivamente bajo cotización, la formulación del problema en términos de un umbral y no de un costo total, permitió sortear la principal restricción de información del estudio y entregar un criterio que el operador puede aplicar de manera directa: recibida la cotización de ambos equipos, basta contrastar la diferencia de precio contra dicho umbral.

Contrastado ese umbral con los escenarios evaluados, el reemplazo resulta económicamente conveniente en las seis combinaciones de precio y razón de sobreprecio analizadas. Bajo la razón de 1,12, adoptada como caso base y respaldada de manera independiente por el dato sectorial y por el mercado automotriz, la conveniencia se verifica en los tres escenarios de precio con plazos de recuperación descontados de entre dos años y medio y cuatro años y tres meses. La combinación menos favorable, el escenario de precio más alto junto con la razón de sobreprecio conservadora, resulta conveniente por un margen estrecho de 12% y recupera la inversión recién al término del horizonte.

El análisis de sensibilidad confirmó la robustez de esta conclusión: ninguna variación individual de los seis parámetros examinados la revierte. Dicho análisis arrojó además un resultado de valor práctico. El precio del paquete de baterías, que constituía la principal incógnita comercial del estudio, es el parámetro de menor incidencia sobre el resultado, mientras que los dos de mayor peso el factor de carga del motor y la tarifa eléctrica aplicable, no provienen de cotizaciones sino de la operación y de la regulación. El esfuerzo de levantamiento de información debe concentrarse, por tanto, en medir el régimen de trabajo efectivo de la flota y en establecer la tarifa aplicable al recinto aeroportuario, antes que en refinar los costos de los componentes.

En el plano operacional, el estudio identifica una restricción que no es de naturaleza económica y que condiciona la factibilidad del reemplazo. Con el régimen de trabajo estimado, el consumo diario asciende a 258 kilovatios-hora, cifra que supera en un 61% la capacidad de la mayor batería ofrecida por el fabricante. El equipo requiere en consecuencia una recarga intermedia durante la jornada, de aproximadamente una hora y veinticinco minutos con el cargador integrado de 70 kilovatios. Esta exigencia resulta compatible con un equipo que permanece inactivo el 79% del tiempo, pero su viabilidad depende de la estructura concreta del turno y constituye el punto que debe verificarse con el operador antes de cualquier decisión de inversión.

Una segunda restricción, de carácter estructural, se desprende del catálogo disponible. La oferta eléctrica del fabricante evaluado alcanza hasta equipos de 250 toneladas de peso máximo de despegue admisible; los modelos destinados a aeronaves de mayor porte se ofrecen únicamente en versión diésel. Una conversión completa de la flota de tractores de aeronave no resulta por tanto factible en el estado actual de la oferta, y el segmento más pesado permanecería en tecnología de combustión hasta que el mercado disponga de alternativas.

En el plano ambiental, que motiva buena parte del interés de la industria por esta transición, el reemplazo de una unidad evita la combustión de 22.394 litros de petróleo diésel al año, equivalentes a aproximadamente 60 toneladas de dióxido de carbono de emisión directa, o 600 toneladas a lo largo del horizonte de evaluación. El balance neto de emisiones requiere incorporar el factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional, cuya determinación excede el alcance de esta memoria; cabe señalar, en todo caso, que el beneficio local es inmediato y completo, por cuanto la totalidad de las emisiones de material particulado y óxidos de nitrógeno en plataforma desaparece del punto de uso.

De lo anterior se desprenden cuatro recomendaciones para quien deba tomar la decisión. La primera es medir el factor de utilización efectiva y el factor de carga del motor sobre la flota que opera en el Aeropuerto Arturo Merino Benítez, por ser los parámetros de mayor incidencia sobre el resultado y los que actualmente descansan en literatura extranjera. La segunda es solicitar a la distribuidora la tarifa efectivamente aplicable a un punto de carga de 70 kilovatios en el recinto, en reemplazo del valor residencial empleado. La tercera es exigir al fabricante, al momento de cotizar, el precio del paquete de baterías de reemplazo y su vida útil declarada en ciclos, que son los dos datos que el estudio debió suponer. La cuarta es evaluar la adquisición como un programa de reemplazo gradual de flota y no como una compra aislada, dado que el prorrateo de la infraestructura de carga entre dos o tres equipos eleva el umbral admisible entre un 9% y un 13%.

En síntesis, el reemplazo de tractores Push-Back diésel por equipos eléctricos en el Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez resulta económicamente conveniente bajo las condiciones evaluadas, con un margen suficiente para absorber la incertidumbre de los parámetros que el estudio debió suponer. La decisión no depende del precio absoluto de los equipos, que no es público, sino de que la diferencia de precio entre ambas variantes se mantenga por debajo de un umbral determinable con la información disponible. Ese desplazamiento del problema —de un costo total indeterminable a un umbral verificable— es lo que permite convertir una pregunta que la falta de información comercial dejaba abierta en un criterio de decisión aplicable.

Bibliografía

AAA. (30 de Octubre de 2025). Obtenido de Major Milestones in EV History: https://ev.aaa.com/articles/ev-history/

Ahmadi, S. (2023). Airport operations with electric-powered towing alternatives under. *Journal of Air Transport Management*, 12.

Airports Council International. (Agosto de 2024). Obtenido de FAA VALE and ZEV Grants: https://airportscouncil.org/2024/08/16/faa-vale-and-zev-grants/

Akgunduz, A. (2023). Airport operations with electric-powered towing alternatives under. *Journal of Air Transport Management*, 12.

Allied Market Research. (Enero de 2022). Obtenido de Electric Vehicle Market (2021-2030): https://www.alliedmarketresearch.com/electric-vehicle-market

Alruwaili, M. (2022). Airport electrified ground support equipment for providing ancillary. *Electric Power Systems Research*, 10.

AMS Schiphol. (3 de Enero de 2019). Obtenido de Electricity replaces diesel for aircraft at Royal Schiphol Group airports: https://news.schiphol.com/electricity-replaces-diesel-in-aircraft-at-schiphol-group-airports/

ANAC. (Julio de 2024). Obtenido de Informe de Cero y Bajas Emisiones: https://www.anac.cl/category/estudio-de-mercado/?anno=2024

ANAC. (Julio de 2025). Obtenido de Informe de Cero y Bajas Emisiones: https://www.anac.cl/category/estudio-de-mercado/?anno=2025

ANAC. (Diciembre de 2025). Obtenido de Informe Cero y Bajas Emisiones: https://www.anac.cl/category/estudio-de-mercado/?anno=2025

ANAC. (Abril de 2026). Obtenido de Informe Cero y Bajas Emisiones: https://www.anac.cl/category/estudio-de-mercado/?anno=2026

ATAG. (2024). Obtenido de Aviation and Climante Change: https://atag.org/media/gw5cgzzh/fact-sheet_2_aviation-and-climate-change.pdf

Autopedia. (Marzo de 2026). Obtenido de Autos eléctricos en Chile: http://autopedia.cl/autos-electricos-hibridos

Aviaton Pros. (19 de Mayo de 2022). Obtenido de Historical Highlights of the GSE Industry: https://www.aviationpros.com/ground-support-worldwide/gse/article/21265092/historical-highlights-of-the-gse-industry

Bao, D.-W. (2023). Mixed fleet scheduling method for airport ground service vehicles under the trend of electrification. *Journal of Air Transport Management*, 17.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (4 de Agosto de 2013). Obtenido de Ley N° 18.502: Establece impuestos a combustibles que señala: https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=29903

BloombergNE. (2025). Obtenido de FLithium-Ion Battery Pack Prices Fall to $108 Per Kilowatt-Hour, Despite Rising Metal Prices: https://about.bnef.com/insights/clean-transport/lithium-

ion-battery-pack-prices-fall-to-108-per-kilowatt-hour-despite-rising-metal-prices-bloombergnef/

BloombergNEF. (2025). Obtenido de Lithium-Ion Battery Pack Prices Fall to $108 Per Kilowatt-Hour, Despite Rising Metal Prices: https://about.bnef.com/insights/clean-transport/lithium-ion-battery-pack-prices-fall-to-108-per-kilowatt-hour-despite-rising-metal-prices-bloombergnef/

California Air Resources Board. (2025). *Clean Off-Road Equipment Voucher Incentive Project (CORE).* Sacramento, CA: California Air Resources Board.

Cardenas, G. (2025). *Análisis de factibilidad para el reemplazo de GPU diésel por unidades a hidrógeno.* Santiago: Universidad Tecnica Federico Santa Maria. Obtenido de Universidad Tecnica Federico Santa Maria.

Carrizo, E. (25 de Mayo de 2026). *La Tercera*. Obtenido de Gobierno publica decreto que neutraliza esta semana el Mepco y empuja el precio de los combustibles a alzas históricas: https://www.latercera.com/pulso/noticia/gobierno-publica-decreto-que-neutraliza-el-mepco-y-empuja-el-precio-de-los-combustibles-a-alzas-historicas/

Comisión Nacional de Energía. (s.f.). Obtenido de Mecanismo de Estabilización de Precios de los Combustibles: https://www.cne.cl/en/tarificacion/hidrocarburos/mecanismo-de-estabilizacion-de-precios-de-los-combustibles-mepco/

Curiosfera. (s.f.). Obtenido de Historia del Tranvía: Inventor y Evolución: https://curiosfera-historia.com/historia-del-tranvia-inventor-origen/

Delta Air Lines. (2023). Obtenido de Tugs, tractors and belt loaders nearly all electric at two Delta hubs: https://news.delta.com/tugs-tractors-and-belt-loaders-nearly-all-electric-two-delta-hubs

dnata. (Febrero de 2024). Obtenido de dnata further enhances sustainability efforts with all-electric airside car switch in Amsterdam: https://www.albawaba.com/business/pr/dnata-further-enhances-sustainability-efforts-all-electric-airside-car-switch-amsterdam

Eagletugs. (s.f.). *Eagletugs.com*. Obtenido de THE HISTORY OF AVIATION GROUND SUPPORT EQUIPMENT: AN AIRCRAFT TRACTOR TIMELINE: https://eagletugs.com/ground-support-equipment-history/

Energia Abierta. (s.f.). *Hidrocarburos.* Obtenido de Bencina en Linea: http://energiaabierta.cl/categorias-estadistica/hidrocarburos/?_sft_etiquetas-estadistica=precio&sort_order=title+asc

García Bernal, N. (2024). *Descongelamiento de tarifas eléctricas. Asesoría Técnica Parlamentaria, N° SUP 141.929.* Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/36131/1/BCN___Descongelamiento_y_alza_tarifas_electricas.pdf

García, N. (2024). *Biblioteca del Congreso Nacional.* Obtenido de Descongelamiento de tarifas eléctricas [Informe de Asesoría Técnica Parlamentaria, N° SUP 141.929]: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/36131/1/BCN___Descongelamiento_y_alza_tarifas_electricas.pdf

Goldhofer. (s.f.). Obtenido de Conventional tractors: https://www.goldhofer.com/en/conventional-tractors

Goldhofer. (Diciembre de 2023). Obtenido de Bison E 370: https://www.goldhofer.com/fileadmin//downloads/BRO_AT/Data_Sheets/DSH_BISON-E370_EN.pdf

Goldhofer. (Septiembre de 2023). Obtenido de Bison D 370 Technical Data: https://www.goldhofer.com/fileadmin//downloads/BRO_AT/Data_Sheets/DSH_BISON-D370_EN.pdf

Goldhofer. (s.f.). *goldhofer.com*. Obtenido de Sherpa Family: https://www.goldhofer.com/en/cargo-and-pushback/sherpa-d

Goldhofer. (s.f.). *goldhofer.com*. Obtenido de Bison D Family: https://www.goldhofer.com/en/conventional-tractors/bison-d-family

Goldholfer. (s.f.). *Goldhofer.com.* Obtenido de AST-1X: https://www.goldhofer.com/en/towbarless-tractors/ast-1x

Hyundai. (2026). Obtenido de All New KONA: https://www.hyundai.cl/content/uploads/ft-kona-sx2-ice.pdf

Hyundai. (2026). Obtenido de All New KONA electrico: https://www.hyundai.cl/content/uploads/ft-kona-ev.pdf

IATA. (s.f.). Obtenido de Electric GSE. International Air Transport Association.: https://www.iata.org/en/programs/ops-infra/ground-operations/ground-support-equipment/electric-gse/

IATA. (s.f.). Obtenido de Electric GSE: https://www.iata.org/en/programs/ops-infra/ground-operations/ground-support-equipment/electric-gse/

IATA. (2024). Obtenido de Net Zero Progress Report: https://www.iata.org/contentassets/252e4a52294e4d86928fb5fd8a1ffd5c/netzero-progressreport2024.pdf

IATA. (s.f.). *Energy and New Fuels Infrastructure.* Obtenido de Net Zero Roadmap: https://www.iata.org/en/programs/environment/roadmaps/

ICF. (2024). Obtenido de Electric Ground Support Equipment: Opportunities for Airports: https://www.icf.com/insights/aviation/electric-ground-support-equipment-opportunity

IEA. (2025). Obtenido de International Energy Agency: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025

KLM. (11 de Diciembre de 2024). Obtenido de KLM puts electric Goldhofer Sherpa into use: https://news.klm.com/klm-puts-electric-goldhofer-sherpa-into-use/

Layan, V. (16 de Noviembre de 2020). *Schneider Electric.* Obtenido de The important role of ground support equipment in the race toward airport sustainability: https://blog.se.com/infrastructure-and-grid/transportation/2020/11/16/the-important-role-of-ground-support-equipment-in-the-race-toward-airport-sustainability/

Lee, N. T. (3 de Marzo de 2023). Asia News Network. Obtenido de S'pore to roll out green transport initiatives, including electrifying airside vehicles: https://asianews.network/spore-to-roll-out-green-transport-initiatives-including-electrifying-airside-vehicles/

Ministerio de Energía. (13 de Diciembre de 2017). Obtenido de Conoce la nueva Estrategia Nacional de Electromovilidad: https://energia.gob.cl/noticias/nacional/conoce-la-nueva-estrategia-nacional-de-electromovilidad

Ministerio de Energía. (2021). Obtenido de Estrategia Nacional de Electromovilidad. Gobierno de Chile: https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia-nacional-electromovilidad_ministerio-de-energia.pdf

Narayan, L. (15 de Julio de 2026). *Precedence Research*. Obtenido de Electric Vehicle Market: https://www.precedenceresearch.com/electric-vehicle-market

One Air. (s.f.). *oneair.es*. Obtenido de Qué es pushback : https://www.oneair.es/que-es-pushback-aviones/

Periscope. (17 de Mayo de 2023). Obtenido de The Rise and Fall of Electric Car: https://periscopeglobal.substack.com/p/the-rise-and-fall-of-electric-cars

Pierobon, M. (8 de Octubre de 2024). Aviation Pros. Obtenido de How Ground Handlers are Embracing Green Operations: https://www.aviationpros.com/ground-support-worldwide/ground-handling/article/55139228/how-ground-handlers-are-embracing-green-operations

Royal Schiphol Group. (9 de Agosto de 2023). Obtenido de New electric equipment for parked planes at Schiphol: https://news.schiphol.com/new-electric-equipment-for-parked-planes-at-schiphol/

Safire, W. (14 de Enero de 2007). *The New York Times*. Obtenido de Pushback: https://www.nytimes.com/2007/01/14/magazine/14wwln_safire.t.html

Servicio de Impuestos Internos. (5 de Octubre de 2007). Obtenido de Impuesto Especifico a los Combustibles: https://www.sii.cl/pagina/jurisprudencia/judicial/2007/otras/jj2384.htm

Timmermans, K. (2025). The impact of transitioning to electric Ground Support Equipment on the fleet capacity and energy demand at airports. *Case Studies on Transport Policy*, 11.

TLD. (s.f.). Obtenido de TMX-350-E: https://www.tld-group.com/products/conventional-aircraft-tractors/tmx-350-e/

Trepel. (Septiembre de 2024). Obtenido de Perfect to work with: https://trepel.com/wp-content/uploads/2026/08/TREPEL_Brochure_Perfect_to_work_with_09_2024_Web.pdf

US Department of Energy. (15 de Septiembre de 2014). Obtenido de The History of the Electric Car: https://www.energy.gov/articles/history-electric-car

Westerheide, C. (3 de Julio de 2025). electrive. Obtenido de Swissport invests €1.5 billion to build world's largest electric GSE fleet: https://www.electrive.com/2025/07/03/swissport-invests-e1-5-billion-to-build-worlds-largest-electric-gse-fleet/

Yan, N. (2026). Optimal vehicle fleet and charging strategy for electric ground service. *Transport Policy*, 17.

Zhang, Y. (2026). Accelerating airport decarbonisation: Qualitative investigation of. *Journal of the Air Transport Research Society*, 11.

Zhou, P. (2025). A comprehensive review of ground support equipment scheduling for aircraft ground handling services. *Transportation Research Part E*, 34.

Anexo