

Programa Tecnológico HIDROHAUL¹

Estudio del arte de Camiones de Patio (Yard Trucks) con celdas de combustible a H₂ para Centros Logísticos.

Resumen público

23 de septiembre de 2025. Santiago, Chile

Dr. Rubén Pérez-Jeldres^a, Alonso Garrido^b, Dr.(c) Byron Hurtubia^c, Luis Marin^d

^a Director Técnico Programa Tecnológico HidroHaul. rubenperez@iee.cl

^b Estudiante de Ing. Civil Eléctrica. Universidad de Concepción. Pasante HidroHaul.

^c Jefe de Ingeniería e Innovación. Mining3.

^d Head de Mining3 Chile. Mining3

Resumen

HidroHaul es un Programa Tecnológico, implementado por IEE, Mining 3, Marval, Copec y Walmart Chile; con el apoyo de CORFO. El programa cuenta con un portafolio de proyectos para evaluar y validar tecnologías de hidrógeno con foco en el sector logístico y transporte en Chile. Dentro de este portafolio, se encuentran camiones de Patio usualmente usados para transportar contenedores descargados desde los andenes del Centro de Distribución a su lugar de acopio. Estos equipos al funcionar con diésel pueden emitir el equivalente a 27 vehículos livianos en gases de efecto invernadero y 152 vehículos en material particulado (PM_{2,5}). Dado el compromiso país con el desarrollo de la electromovilidad y la industria del hidrógeno verde, es natural preguntarse: ¿Hay prototipos a hidrógeno funcionales? ¿Qué experiencia se reporta en la literatura? ¿Qué empresas y países están liderando el desarrollo de Yard Trucks a hidrógeno? Para responder estas preguntas se realizó un estudio del arte focalizado en Yard Trucks a hidrógeno tomando un rango de 10 años, a fin de ser usada como información base para el proyecto Yard Truck de HidroHaul. Este estudio identificó que, a nivel científico, industrial y comercial, es una tecnología con una madurez tecnológica (TRL) de 8, identificando prototipos funcionales cuyo desempeño ha sido evaluado en pruebas de campo en operaciones rutinarias logísticas o en puertos. Sin embargo, es posible que requieran más pruebas de campo, bajo otras condiciones operacionales, para alcanzar una fase comercial.

¹ <https://www.iee.cl/hidrohaul/>

1 Introducción - ¿Por qué Yard Trucks?.



Figura 1. Yard Truck referencial.

Los camiones de patio - también conocidos como tractores de patio, Ottawas, *Terminal Trucks*, *Yard Trucks* o *Yard Hostlers* (ver **Figura 1**²)- son un equipo especializado del sector logístico para el movimiento de remolques o contenedores en espacios cerrados. Usualmente se emplean en centros de distribución, puertos, aeropuertos y en complejos industriales, facilitando desplazamientos

cortos dentro de áreas restringidas donde su gran maniobrabilidad (ruedas traseras sólidas, radio de giro reducido) supera a la de los camiones de carretera. Estos vehículos, basados en motores diésel, poseen una alta potencia de tracción y son sometidos a ciclos de trabajo irregulares de alto par y frecuentes arranques y parados, los que los hacen altamente ineficientes energéticamente y una fuente emisora de gases polutantes (NO_x, PM, HC) y de efecto invernadero (GEI) (Ver **Tabla 1**)[1]. Es así como, un Yard Truck Diésel puede emitir anualmente el equivalente a 27 vehículos³ en términos de gases de efecto invernadero y a 152 vehículos⁴ en la emisión de PM2.5

Tabla 1. Resumen de parámetros operacionales típicos de un Yard Truck a diésel [1].

Parámetro	Valor	Unidad
Horas de uso	3.000	[horas/año]
Consumo	45.728	[l/año]
Emisiones GEI y polutantes		
- NO _x	341.2	[kg/año]
- PM 2,5	12.3	[kg/año]
- HC	18.6	[kg/año]
- CO ₂	123.340	[kg/año]
Principales OEM		
Kalmar, Doosan, Yale, Terex, TCM, Manitou, Toyota, Raymond, Paccar, Liebherr, Mitsubishi, Hyundai,		

En un centro de distribución un conductor de Yard Truck puede realizar 5 movimientos de contenedores por hora[2] y entre un 25% y 30% más de movimientos si cuenta con un sistema avanzado de gestión de patios (YMS)[3]. Ello equivale a que, con un Yard Truck, se podrían mover entre 120 y 167 contenedores por día⁵. Sin embargo, la capacidad de movimiento de contenedores de un Yard Truck depende del tamaño del

² Figura referencial obtenida de la página web de Kalmar [35]

³ Un vehículo de pasajeros típico emite anualmente 4.600 kg CO₂[36]

⁴ Un vehículo de pasajeros típico diésel emite anualmente 81 g PM2.5[37].

⁵ Valor calculado considerando 3 turnos de 8 horas al día.

centro de distribución, la cantidad de puertas de descarga, la ubicación donde los contenedores son estacionados, entre otras variables. En la planta de ensamble de camiones de Daimler en Saltillo, México, existe un centro de distribución adyacente con una superficie de 18.580 m², el cual maneja en promedio 180 contenedores de entrada diarios, con unos 550 contenedores en patio total, ocupando 4 Yard Trucks por 100 movimientos diarios [4]. Por tanto, un Centro de Distribución de 18.580 m² emitirá anualmente alrededor de 500 ton CO₂, y 48 kg MP2.5 aproximadamente, sólo por el uso de Yard Trucks. Si bien, en nuestro país, no existe un catastro oficial de Centros de Distribución, se identificó que Nestlé Chile posee 8 centros de distribución, en el 2021 Mercado Libre planeaba operar 16 centros logísticos/regionales en Chile, Walmart posee 3 centros de distribución en Santiago – otros 5 en regiones –, y se identifican más de 20 centros de distribución en el SNIFA⁶ pertenecientes a CCU, Anasac, Cencosud, Cementos Bío-Bío, entre otras empresas [5–8]. Si bien se contabilizan 47 centros de distribución, que podrían utilizar Yard Trucks, esta cantidad puede crecer si se consideran puertos, aeropuertos, y otros centros logísticos no identificados. Lo anterior permite la replicabilidad del uso de Yard Trucks a Hidrógeno en el país, como también su contribución en la descarbonización de estos centros y agregando atributo verde a las mercancías que se transporten o manteniendo el atributo verde de aquellos insumos verdes. No obstante, quedan preguntas abiertas como: ¿Hay prototipos a hidrógeno funcionales? ¿Qué experiencia se reporta en la literatura? ¿Qué empresas y países están liderando el desarrollo de Yard Trucks a hidrógeno? Son preguntas que responderemos en las secciones siguientes.

2 Metodología

Para responder las preguntas anteriores, se realizó una búsqueda de información en bases de datos especializadas, artículos científicos, patentes, estudios y reportes técnicos, noticias y fuentes públicas disponibles, utilizando palabras clave como “Yard Truck”, “emission”, “fuel cell”, entre otras, y aplicando un filtro temporal de los últimos 10 años. La revisión de literatura científica tuvo por objetivo identificar tecnologías de Yard Trucks en fases tempranas de desarrollo, normalmente vinculadas a la investigación aplicada o a proyectos de colaboración Académica-Privada, comunes en países con ecosistemas de innovación desarrollados. La búsqueda de patentes estuvo orientada a detectar aquellos desarrollos con protección de propiedad intelectual, ya que se encuentran próximos a entrar a una fase de comercialización. La revisión de noticias, estudios y reportes técnicos permitió identificar aquellos Yard Trucks piloto en fase de prueba, que son producto del esfuerzo de colaboraciones entre privados o de alianzas público-privada, como HidroHaul. Finalmente, la información recolectada fue

⁶ Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental

categorizada, y evaluada en cuanto a su origen, priorizando el uso de fuentes de información primaria, en aquellos casos en que se trató de referencias secundarias, se procedió a localizar y analizar el documento original.

3 Resultados

3.1 Revisión de artículos científicos



Figura 2. Mapa de publicaciones relacionadas con Yard Truck por país de origen.

La búsqueda de publicaciones científicas reveló 47 artículos en que se hace mención a Yard Trucks, en que 26 de estas publicaciones se concentran en China (Ver **Figura 2**) 5 en Turquía, y el resto de los países tienen entre 1 y 2 publicaciones. Considerando el período entre el 2015 y 2025, la cantidad de publicaciones sobre Yard Trucks alcanza su pico en el 2021 y a la fecha ha tenido una disminución decreciente.

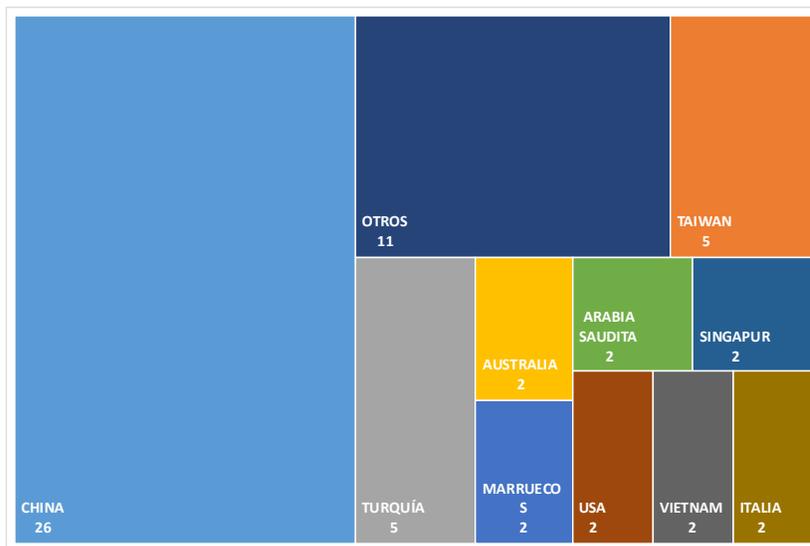


Figura 3. Cantidad de publicaciones relacionadas con Yard Truck por país de origen.

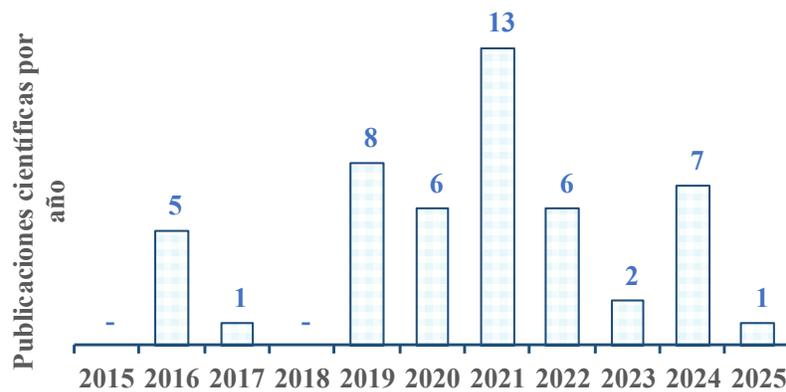


Figura 4. Cantidad de publicaciones científicas relacionadas con Yard Truck durante los últimos 10 años.

De los artículos identificados⁷, 42 se enfocan a sistemas que busca optimizar el ordenamiento de contenedores, 4 en la reducción de emisiones como consecuencia de la descongestión del uso de Yard Trucks en puertos, y sólo se identificaron cinco artículos de interés técnico asociados a la evaluación de un tren de potencia híbrido de baterías con celdas de combustible a hidrógeno para Yard Truck para aplicaciones portuarias, que se analizan en los párrafos siguientes.

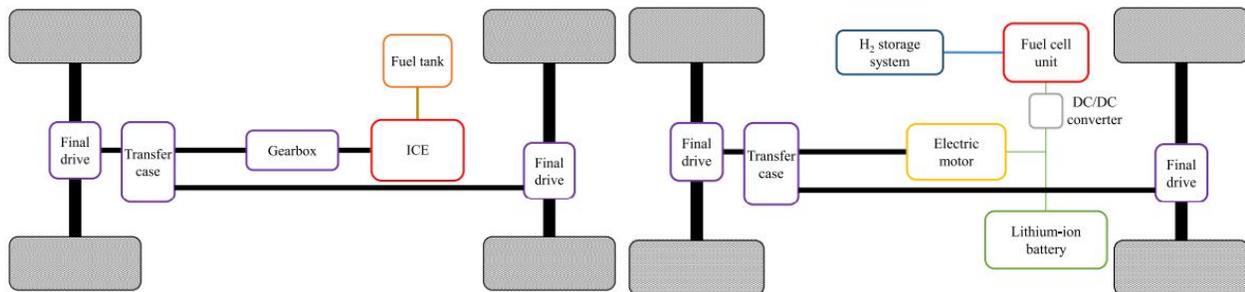


Figura 5. Representación esquemática del tren de potencia diésel (izq.) y del tren eléctrico con celdas de combustible y batería (der.) [9].

Di illio *et al.* [9], realizaron una campaña de medición en terreno para analizar los ciclos de trabajo de un Yard Truck Diésel Terberg modelo RT223 durante maniobras Roll-on/Roll-off⁸ en el Puerto de Salerno (Italia)⁹. La dinámica del camión fue modelada y validada con los datos medidos en terreno, con el objetivo de usar este modelo para obtener parámetros de energía, potencia, entre otros, como determinar la relación

⁷ Sólo se incorpora la referencia a los artículos que se discuten en detalle dentro del cuerpo del documento.

⁸ Términos usados en logística y transporte marítimo para describir el que el Yard Truck engancha un tráiler en el patio y lo sube rodando al barco por una rampa (Roll-on) o el Yard Truck entra vacío al barco, engancha un tráiler cargado y lo baja rodando hacia el patio (Roll-off).

⁹ El Yard Truck analizado cuenta con un motor Volvo TAD871VE con una potencia de 185 kW @ 2.200 rpm.

batería-celda de combustible para el tren de potencia (Ver **Figura 5**) que mejor se adapta a las condiciones operacionales del puerto. El tren de potencia consiste en un motor eléctrico Danfoss EM-PMI375-T1100 con una eficiencia máxima del 95%, acoplado a una batería de 50 kWh LiFePO₄ optimizada para recuperar entre un 85 y 100% de la cinética disponible en frenadas, mientras que la celda de combustible corresponde a una Ballard FCmove-HD de 70 kW, la cual fue sobredimensionada para enfrentar variabilidad operacional. En base a los resultados obtenidos (Ver **Tabla 2**) el tren híbrido cumple e incluso mejora los tiempos de operación frente al diésel, reduce el consumo energético en un 40-55%, y elimina emisiones locales.

Tabla 2. Comparación de trenes motrices para Yard Trucks probados en el Puerto de Salerno (Tabla creada a partir de información de Di Illio *et al.* [9]).

INDICADOR	TREN DIÉSEL (TERBERG RT223)	TREN HÍBRIDO H ₂ /BATERÍA
<i>Tiempo de operación continuo</i>	6 h (Roll-on y Roll-off, medido)	6,2 h (Roll-on) / 10,7 h (Roll-off)
<i>Autonomía (distancia recorrida en misión)</i>	~57 km (estimado en 6 h Roll-on)	57 km (Roll-on) / 97,5 km (Roll-off)
<i>Consumo energético (6 h)</i>	724 kWh (Roll-on) / 538 kWh (Roll-off)	383 kWh (Roll-on) / 197 kWh (Roll-off)
<i>Consumo de combustible (6h)</i>	59,2 kg diésel (Roll-on) / 44 kg diésel (Roll-off)	11,5 kg H ₂ (Roll-on) / 5,9 kg H ₂ (Roll-off)
<i>Eficiencia global¹⁰</i>	Baja (pérdidas en ICE + transmisión)	Alta (sin caja de cambios + regeneración)
<i>Emisiones locales¹¹</i>	CO ₂ , NO _x , PM, ruido	Cero emisiones locales, bajo ruido
<i>Mantenimiento</i>	Alto (motor diésel, transmisión)	Menor (menos partes móviles, sin gearbox)
<i>Respuesta dinámica (picos de potencia)</i>	Hasta ~181–190 kW	Hasta ~176 kW (batería cubre picos)

Lombardi *et al.* [10] proponen una estrategia de Sistema de Manejo de Energía (o EMS¹²) basada en reglas para un Yard Truck con tren de potencia híbrido de baterías con celdas de combustible, con foco en instalaciones portuarias y que es la continuación del trabajo de Di Illio[9]. El Yard Truck simulado por Lombardi *et al.* posee una PEMFC Ballard de 70 kW con una batería de litio de 25 kWh acoplada a un motor Danfoss, manteniendo la transmisión y la *gearbox* del Yard Truck donante (Terberg RT223). El sistema de manejo de energía diseñado busca minimizar el consumo de hidrógeno sujeto a restricciones impuestas (demanda del conductor, límites de potencia, limitar los repentinos cambios de potencia para evitar periodos transientes en la celda y que sean absorbidos por la batería, entre otros). La **Tabla 3** presenta una comparación ejecutiva

¹⁰ Eficiencia Tank-to-Wheel

¹¹ El artículo no incluye valores de emisiones GEI, polutantes y de emisión.

¹² Del inglés Energy Management System (EMS)

de la operación simulada del Yard Truck con y sin el EMS propuesto por Lombardi *et al.* Liu *et al.* [11] realizaron un estudio similar, en donde el uso de su algoritmo de optimización para el EMS permite reducir entre 5,57% y 7,84% los consumos de hidrógeno del Yard Truck, considerando un turno de 6 horas de trabajo y manteniendo el SOC en un rango entre el 30% y 90%.

Tabla 3. Comparación del EMS híbrido sin EMS y con el EMS propuesto por Lombardi (Tabla creada a partir de información de Lombardi *et al.* [10]).

INDICADOR	HÍBRIDO SIN EMS (CONTROL BÁSICO)	HÍBRIDO CON EMS PROPUESTO
Tiempo de operación	Cumple turno de 6 h, pero con uso ineficiente de la celda y batería	Cumple y extiende autonomía
Consumo de H ₂	Mayor consumo por uso no optimizado de la celda	Hasta 5% menor (cercano al óptimo teórico)
Uso de la batería	Menor participación, celda asume más fluctuaciones de carga	La batería asume más fluctuaciones rápidas de carga del motor.
Eficiencia global	Menor, por transitorios frecuentes en la celda y sobredemanda de potencia	Mayor, celda operando en régimen estable y batería absorbiendo picos
Esfuerzo sobre la celda (dPFC/dt ¹³)	Elevado, con transitorios que acortan vida útil	Operación más estable, la EMS evita transientes, reduce esfuerzo de la celda y protege la celda
Robustez operativa	Dependiente del perfil de operación y menos predecible	Mayor robustez ante variabilidad de operación portuarias

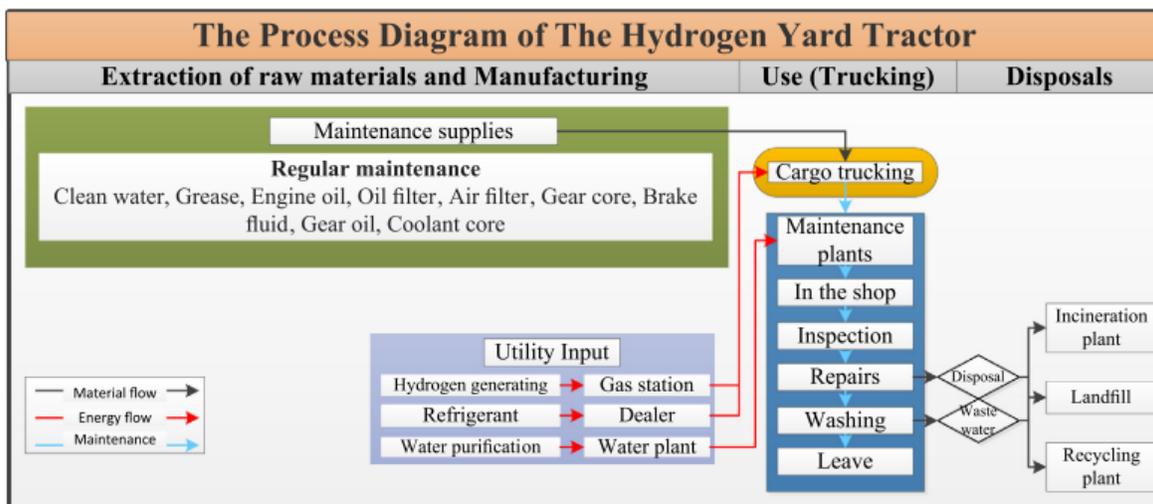


Figura 6. Diagrama de procesos considerados para el yard truck a H₂ para el análisis de ciclo de vida realizado por Chang *et al.* [12].

Chang C. *et al.* [12] realizaron un análisis de ciclo de vida de Yard Trucks a hidrógeno en el puerto de Kaohsiung, Taiwán. El análisis incluye alternativas de camiones diésel,

¹³ Refiere a los cambios de potencia a los cuales está sujeto la celda de combustible.

eléctricos, LNG y celdas a combustible a hidrógeno, considerando los estándares ISO 14040:2006, ISO 14044:2006, ISO 14064-1:2006 y ISO/TS 14.067:2013. Los autores consideraron manuales de mantenimiento para los Yard Truck eléctrico e hidrógeno, la guía de mantenimiento para Baterías Nissan Leaf de Nissan Motor Corporation, y el manual de mantenimiento de Hyundai Motor Corporation para el modelo Tucson (SUV), respectivamente. En base a estos, desarrollaron diagramas de procesos que incluyen la mantenimiento regular (Ver **Figura 6**). En base a la operación descrita por Di Illio *et al.* y Lombardi *et al.*, los requerimientos de mantenimiento de un Yard Truck deben ser muy distintos a los de un vehículo para transporte de pasajeros, dado que poseen ciclos de trabajo muy distintos. Pese a esto, el trabajo de Chang *et al.* [12] presenta un enfoque metodológico interesante, en donde el 99% de las emisiones provienen de los insumos del Yard Truck (Licuefacción de hidrógeno y fugas de refrigerante – Ver **Tabla 4**). El artículo no hace una descripción de la instalación de dispensado de hidrógeno analizada. Entre las 4 tecnologías de Yard Truck analizadas por Chang *et al.*, se observa que la alternativa de hidrógeno es la que genera un 69% y un 21% menos de emisiones de gases de efecto invernadero que las alternativas diésel y eléctrico (Ver **Tabla 5**), respectivamente.

Tabla 4. Emisiones reportadas por Chang *et al.* para un Yard Truck a hidrógeno[12].

ETAPA	HUELLA DE CARBONO	%
Insumos para la operación y mantenimiento de Yard Trucks		
- Licuefacción de hidrógeno	13.069 [kgCO ₂ e]	95,32%
- Insumos de mantenimiento	32,43 [kgCO ₂ e]	0,24%
Uso de Yard Trucks		
- Hidrógeno líquido	0 [kgCO ₂ e]	0
- Refrigerante	373[kgCO ₂ e]	2,72%
Disposición del Yard Truck	236 [kgCO ₂ e]	1,72%
Huella de carbono del ciclo de vida	13.710 [kgCO ₂ e]	100%
Intensidad de emisión por ton-km	2,0x10 ⁻⁶ [kgCO ₂ e/ton-km]	

Tabla 5. Comparación de emisiones producidas por el uso de Yard Trucks para 4 tipos de tecnologías (Tabla creada a partir de información de Chang C. *et al.*[12]).

COMBUSTIBLE	EMISIONES TOTALES CICLO DE VIDA (kgCO ₂ e)	INTENSIDAD DE EMISIÓN (kgCO ₂ e/ton-km)	EFICIENCIA
Diésel	43.871	6,40x10 ⁻⁶	2,43 [km/L]
Eléctrico	16.564	2,42x10 ⁻⁶	11,54 [kWh/h]
GNL	33.560	4,89x10 ⁻⁶	0,9125 [km/L]
Hidrógeno	13.710	2,00x10 ⁻⁶	16 [km/kg]

Wang P. *et al.* [13] proponen y evalúan los efectos de tres estrategias de programación (dinámica, basadas en reglas y algoritmos genéticos) en el sistema de manejo de energía en Yard Trucks híbridos de baterías de Litio con celdas de combustible a hidrógeno, con el objetivo de identificar cuál de las tres estrategias programadas podría minimizar el consumo de hidrógeno hasta un 10%. Para el análisis el estudio considera como base los trenes de potencia Yard truck diésel de las marcas Volvo, Benz, Xcient y Shaanxi Auto, los cuales son simulados operando con un tren de potencia híbrido considerando 5 combinaciones de celdas y batería (Ver **Tabla 6**).

Tabla 6. Configuraciones de tren de potencia híbrido de celdas de combustible a hidrógeno (HFC) y baterías analizadas por Wang P. *et al.* [13]

CONFIG.	HFC [kW]	CAP. BATERÍA [kWh]	POT. MÁX. BATERÍA [kW]
T1	160	70	350
T2	180	70	350
T3	160	80	400
T4	160	80	350
T5	180	80	400

Wang P. *et al.* [13] realizaron 10 corridas del modelo considerando las tres estrategias de programación para 1 ciclo y 6 horas de operación, determinando que la programación dinámica (DP) y de algoritmo genético (GA) proporcionaban un menor consumo del Yard Truck en comparación con la programación en base a reglas (Ver **Figura 7**). Al simular bajo distintas condiciones los algoritmos dinámico y genético, los autores concluyen que la programación dinámica del EMS es la metodología que permitiría operar al Yard Truck bajo menor consumo de hidrógeno (Ver **Figura 8**).

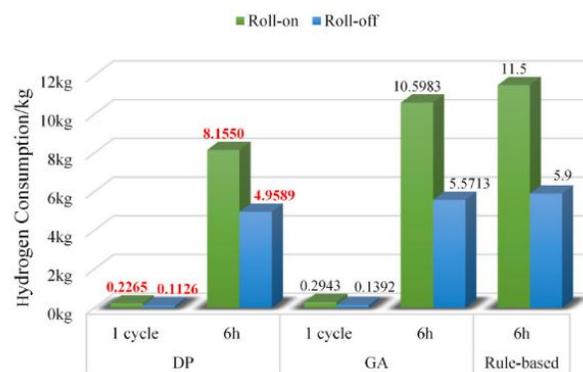
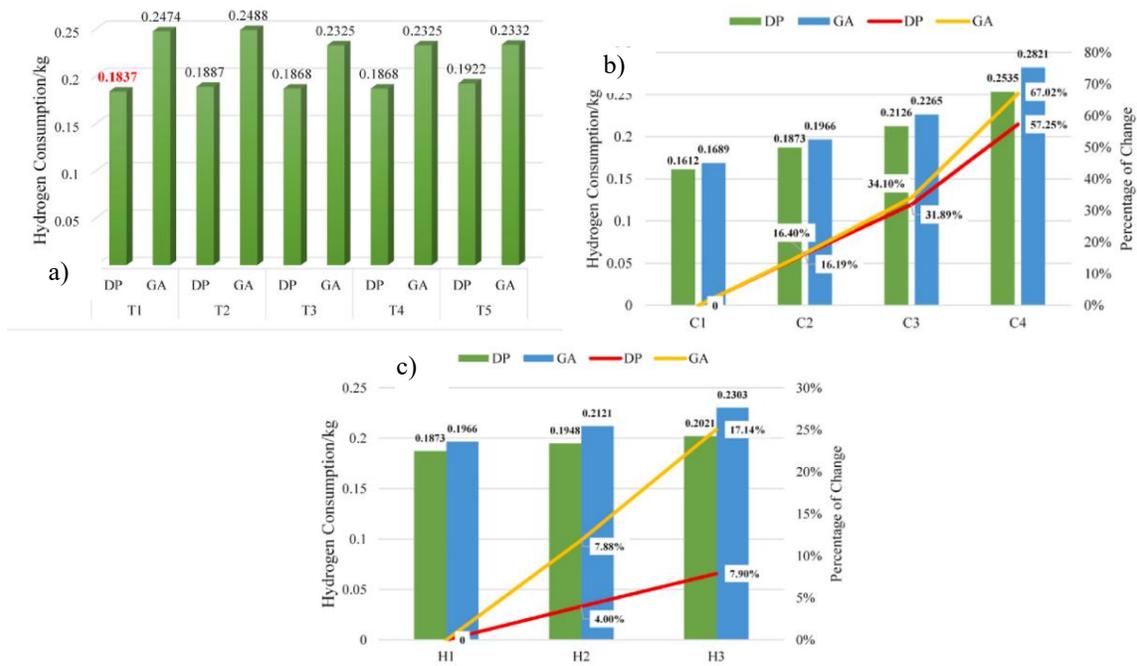


Figura 7. Comparación de consumos de hidrógeno para un Yard Truck híbrido para tres estrategias de programación (programación dinámica, algoritmo genético y basado en reglas) obtenidos por Wang P. *et al.* [13].



(a) Configuraciones (b) Frecuencias de encendido-parada (c) Cargas pesadas
Figura 8. Consumo de hidrógeno calculado bajo los algoritmos dinámico y genético para diferentes condiciones obtenidas de Wang P. *et al.* [13].

Si bien no se identificaron artículos que presentaran costos de la reconversión de Yard truck convencionales a versiones híbridas. Zhang Q. *et al.* [14] realizaron un estudio que formula y resuelve un problema estocástico para planificar el reacondicionamiento y despliegue en Yard Trucks en puertos “verdes”, considerando transporte de materiales peligrosos. El estudio incorpora costos de compra, costos de reconversión, costo de arriendo de Yard Trucks, operación, penalizaciones y emisiones (Ver **Tabla 7**). Lo anterior, considerando que la flota de Yard Trucks puede estar comprendida por Yard Trucks Diésel tripulados, eléctricos tripulados, eléctricos no-tripulados, y a gas natural licuado no tripulados. A partir de la simulación de Zhang *et al.* se observa que la reconversión de Yard Truck diésel en términos del costo total de operación del puerto es altamente sensible al costo unitario de la reconversión. Si bien el artículo no presenta un análisis de comparación con una condición base de operación con 100% diésel tripulado, todos los análisis de los autores muestran que el costo de operación total aumenta cuando se incluyen Yard Trucks reacondicionados a eléctricos (Ver **Figura 9**).

Tabla 7. Costos considerados por Zhang *et al.* para el análisis de composición de una flota de Yard Truck en un puerto “verde” [14].

Variable \ Tipo de Yard Truck	Diésel	Batería	Batería	LNG
	Tripulado	Tripulado	No-Tripulado	No-Tripulado
¿Puede operar tareas peligrosas ? ¹⁴	Sí	Sí	No	No
¿Puede operar tareas no peligrosas ?	Sí	Sí	Sí	Si
Costos de Retrofit en millones de RMB				
Diésel a Eléctrico o LNG	No aplica	11,85	20	7 a 9,5
Eléctrico tripulado a no-tripulado	No Aplica	No Aplica	8	No aplica
Costos de operación por tarea en RMB				
No peligrosa	7,213	1,185	1,185	5.122
Peligrosa	14,426	2,370	No aplica	No aplica
Capacidad máxima por paso de tiempo en TEU¹⁵				
No peligrosa	10.800	21.600	17.280	11.600
Peligrosa	6.480	12.960	No aplica	No Aplica
Emisiones por TEU¹⁶ (kgCO₂/TEU)	0.592	s/i	s/i	0.435

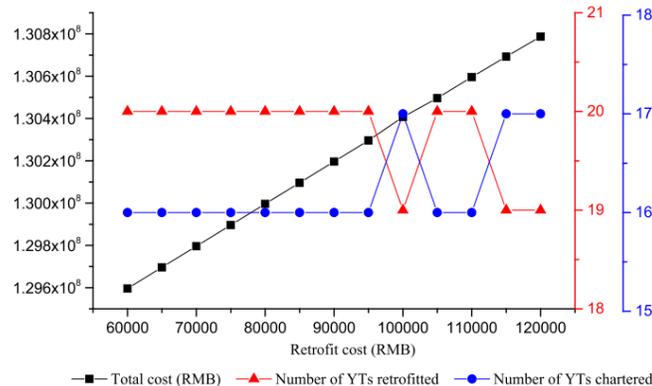


Figura 9. Costo total de operación en RMB según combinación de yard truck reconvertidos a eléctricos y arrendados a diésel [14].

3.2 Revisión de patentes

Para la identificación de patentes nacionales, se realizaron búsquedas en el indexador de INAPI (Instituto Nacional de Propiedad Industrial). El panorama actual en Chile, indica que no hay patentes de ningún tipo registradas para este tipo de vehículos. Esto puede ser un indicador de que modelos a celdas de combustible de Yard Trucks aún no han entrado a una fase pre-comercial o no se estarían desarrollando en el país.

¹⁴ Los autores consideran que solo Yard Trucks tripulados pueden manejar materiales peligrosos

¹⁵ TEU refiere al inglés twenty-foot equivalent Units cuya traducción en *unidades equivalentes a 20 pies*

¹⁶ El artículo usa valores obtenidos de otros autores.

La identificación de patentes internacionales fue realizada mediante el uso de las plataformas Google Patents y Espacenet, identificando dos patentes que se presentan a continuación:

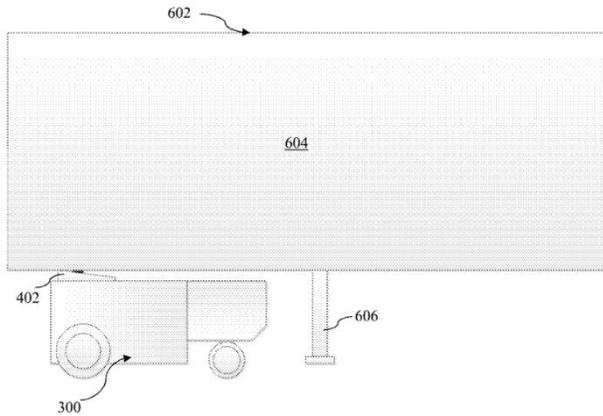


Figura 10. Esquema del vehículo Yard Truck propuesta en patente US10.514.700B2[15].

La patente US10.514.700B2 (propiedad de Walmart Apollo, LLC) [15] describe un sistema y método para la gestión automatizada de patios de almacenamiento de vehículos y remolques basados en la coordinación entre un módulo de control y un camión de patio autónomo sin cabina equipado con múltiples sensores. El módulo de control coordina las órdenes de

mover, acoplar, posicionar, atracar y almacenar remolques; el camión ejecuta estas tareas mediante tres conjuntos de sensores diferenciados:

- (i) posicionamiento del vehículo (incluida localización satelital),
- (ii) maniobra y alineación fina del remolque respecto a su destino (p. ej., andén o ubicación de patio) y
- (iii) detección y evitación de colisiones con obstáculos o personas.

Un rasgo característico del vehículo es su doble punto de enganche (frontal y trasero), que permite acoplar desde cualquiera de los extremos sin girar el camión, reduciendo tiempos y maniobras. La patente indica que es agnóstica al vector energético del Yard Truck, por lo que puede usar hidrógeno como combustible. El esquema de la patente se muestra en la **Figura 10**.

La Patente JP200503396A (propiedad de STILL GMBH) describe una mejora para Yard Trucks híbridos con un tren de potencia compuesto por baterías y sistema de celda de combustible a hidrógeno, la cual propone sustituir el repostaje de los vehículos por estanques que sean fácilmente reemplazables (en inglés *Quick-Swap*) [16]. El vehículo puede contar con uno o varios estanques que puede usar simultáneamente para cubrir alta demanda o selectivamente (cambio al estanque lleno cuando otro se vacía). La selección del o los estanque(s) puede ser manual por el operador o automática según nivel de llenado y/o demanda de la celda. La **Figura 11** muestra el esquema de la patente y la ubicación de los estanques. Sin embargo, esta patente fue rechazada en Japón en 2009, abandonada en Alemania en 2006 y en Estados Unidos en 2016.

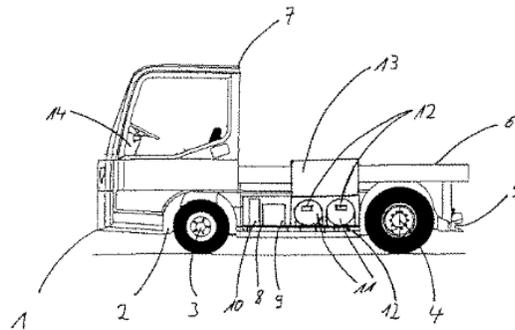


Figura 11. Esquema del vehículo Yard Truck propuesto en patente JP200503396A [16].

3.3 Proyectos piloto de Yard truck a hidrógeno

Los primeros prototipos vinculados a la introducción de Yard Truck con celdas de combustible a hidrógeno se reportaron en el año 2010, teniendo lugar en los puertos de Los Ángeles y de Long Beach, Estados Unidos. En donde, se impulsaron las primeras pruebas de vehículos híbridos (batería-celdas a hidrógeno) en operaciones de movimiento de cargas en distancias cortas (dentro del mismo puerto) y logística portuaria [17,18]. Estas iniciativas establecieron las bases para colaboraciones entre fabricantes de camiones (Vision Industries y Capacity of Texas) y autoridades portuarias, incorporando apoyo de instituciones académicas (Universidad de California – CE-CERT¹⁷) y financiamiento público (CEC¹⁸) como privado (Puerto Long Beach y Puerto de los Ángeles)¹⁹ [17]. Posteriormente, se sumaría la empresa Cargotec para colaborar con los fabricantes para probar los Yard Trucks adaptados a hidrógeno, en el marco del programa oficial “Technology Advancement Program (TAP)” promovido por ambos puertos [19]. También, Vision Industries y Balqon Corporation anunciaron la construcción conjunta del tractor Zero-TT, diseñado para operaciones en centros de distribución, patios ferroviarios y terminales marítimas, combinando un chasis Kalmar con trenes eléctricos de Balqon y extensor de rango de celda de combustible de Vision [20].

Para el 2012, en Europa comenzaron las validaciones en puertos estratégicos (Rotterdam y Amberes), donde empresas tecnológicas (Zepp.Solutions, Terberg y ElringKlinger) probaron tractores terminales propulsados por celdas de combustible. En el caso del puerto de Amberes, se desarrolló bajo el proyecto Hidrolog y el cual involucró la colaboración de 18 empresas belgas para promover el hidrógeno como combustible en

¹⁷ Center for Environmental Research and Technology (Universidad de California) : Colaboró en la evaluación del yard truck híbrido y en el análisis de datos del Puerto de los Ángeles.

¹⁸ California Energy Commission

¹⁹ Puerto Long Beach aportó con 425 kUSD y 212,5 kUSD el Puerto de los Ángeles.

logística de transporte[21]. Para el 2017, las pruebas de prototipos de Yard Trucks diésel modificados a hidrógeno se extendieron a Asia, bajo la colaboración de empresas canadienses (Loop Energy) y chinas (CNHTC²⁰). En donde, reportaron la capacidad de integrar sistemas de extensión de rango a base de hidrógeno en Yard Trucks convencionales (Hova heavy-duty yard truck). Estas experiencias confirmaron que era posible alcanzar niveles de rendimiento comparables al diésel, sumando ventajas en tiempos de repostaje y autonomía, en línea con las exigencias regulatorias de reducción de emisiones [22].

Durante el período de 2019 a 2021, se observó una aceleración en la incorporación de Yard Trucks propulsados por hidrógeno, con una diversidad de actores globales y contextos de aplicación (Ver **Tabla 8**). En Europa, la Autoridad Portuaria de Valencia lideró la iniciativa H2Ports²¹, convirtiéndose en la primera instalación portuaria del continente en integrar hidrógeno en sus operaciones mediante un *reach stacker* y un Yard Truck, acompañados de una estación móvil de abastecimiento, todo ello bajo un consorcio que incluyó a la Fundación Valencia port, el CNH²² y empresas internacionales, con financiamiento del FCHJU²³ [23].



En el marco del proyecto *Project Portal*, Toyota Motor North America, en colaboración con Fenix Marine Services, presentó el Yard Truck híbrido también conocido como Toyota Uno, desplegado en condiciones reales en el Puerto de Los Ángeles. El prototipo utiliza la misma celda de combustible del

vehículo Toyota Mirai y cuenta con dos estanques²⁴, lo cual le permitió operar 2,5 horas por ciclo de prueba con una carga de hidrógeno. Las pruebas del Toyota Uno demostraron la factibilidad de su operación en entorno portuario, debido a los bajos tiempos de recarga (3 minutos) [24].

²⁰ China National Heavy Duty Truck Company

²¹ Proyecto europeo de demostración tecnológica cuyo objetivo es introducir hidrógeno como vector energético en las operaciones portuarias, impulsado por la Autoridad portuaria de Valencia y la Fundación Valencia Port.

²² Centro Nacional de Hidrógeno de España CNH2

²³ Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking

²⁴ La referencia no reporta la capacidad y presión de almacenamiento

Tabla 8. Reportes de experiencias piloto de Yard Trucks (o Terminal Trucks) a hidrógeno.

AÑO	ANUNCIO	DESCRIPCIÓN	REF.	EMPRESAS INVOLUCRADAS	CARACTERÍSTICAS DEL CAMIÓN
2010	Vision Industries evaluará camiones híbridos y tractor terminal	Puerto de Los Ángeles prueba camiones híbridos de hidrógeno y un tractor terminal ZETT™, con apoyo de CE-CERT.	[18]	Vision Industries, Capacity of Texas, CE-CERT (UC Riverside)	Clase 8 híbrido H2/eléctrico; ZETT™ basado en plataforma PHETT™, celda H2 + baterías de litio
2010	Puerto de Long Beach y Vision demuestran camión y tractor de hidrógeno.	Proyecto Tyrano™ y tractor ZETT™ con apoyo financiero portuario y pruebas operacionales en California.	[17]	Vision Motor Corp., Capacity of Texas, Cal Cartage, TTSI	Tyrano™ clase 8 híbrido H2/eléctrico; tractor terminal ZETT™, plataforma PHETT®, módulos HyPM™ de Hydrogenics
2012	Cargotec se une a Vision en demo de tractores terminales	Proyecto TAP para demostrar tractores híbridos Kalmar Ottawa de cero emisiones en puertos de California.	[19]	Vision Industries, Cargotec USA, TTSI	Tractor terminal Kalmar Ottawa con sistema híbrido H2/eléctrico Vision, batería + celda de 65 kW
2012	Tractor terminal de Zepp se traslada a Amberes	Tractor Terberg YT203-H2 probado en Róterdam y Amberes dentro del proyecto Hydrolog.	[21]	Zepp.solutions, Terberg Special Vehicles, ElringKlinger	Tractor terminal YT203-H2 con sistema de celdas H2 ElringKlinger, repostaje móvil H2, pruebas en puertos
2012	Vision y Balqon desarrollan tractor Zero-TT	Acuerdo para construir tractor híbrido H2/eléctrico para terminales y patios ferroviarios.	[20]	Vision Industries, Balqon Corp., Cargotec (Kalmar)	Tractor Zero-TT híbrido H2/eléctrico, chasis Kalmar, tren eléctrico Balqon, extensor de rango FC Vision
2017	Loop Energy prueba tractor terminal en China	Tractor Hova con celda de combustible logra paridad con diésel y ventajas en autonomía y costos.	[22]	Loop Energy, CNHTC (China National Heavy Duty Truck)	Tractor Hova con extensor de rango H2 (tecnología eFlow®), potencia comparable a diésel, repostaje rápido
2019	Valencia será el primer puerto europeo con H2	Proyecto H2Ports introduce reach stacker y tractor terminal de hidrógeno en Valencia.	[23]	APV (Puerto de Valencia), Fundación Valenciaport, CNH2, Hyster-Yale, MSC, Grimaldi, Ballard, Enagás	Reach stacker y tractor terminal con celdas de combustible; estación móvil de H2; inversión €4 millones
2019	Toyota y Fenix demuestran tractor utilitario UTR Uno	Toyota despliega prototipo eléctrico de hidrógeno en Puerto de Los Ángeles.	[24]	Toyota Motor North America, Fenix Marine Services	Prototipo UTR “Uno”, Celda Toyota Mirai, dos estanques H2 (~2.5 h por carga, recarga en 3 min), opción más estanques
2020	Plug Power y Gaussin desarrollan vehículos logísticos H2	Alianza para lanzar tractores terminales y vehículos portuarios con H2 verde en 2021.	[25]	Plug Power, Gaussin, Faurecia	Tractores terminales y AGVs con ProGen FC; almacenamiento H2 Faurecia; red H2 verde Plug Power (100 t/día)
2020	Equipo Holandés presenta tractor terminal YT203-H2	Terberg y Zepp prueban tractor de hidrógeno en Róterdam con apoyo estatal.	[26]	Zepp.solutions, Terberg Benschop, ElringKlinger	Tractor YT203-H2 con 4 tanques H2 (14.4 kg, 350 bar), stack PEM 260/300 celdas, operación diaria en terminal
2021	Proyecto ZECAP prepara prueba de tractores H2 en California	Validación de tractores con sistemas Ballard y BAE en operaciones portuarias.	[27]	GTI, TraPac, Ballard, BAE Systems, CARB, Frontier, Zen CES	Tractor terminal Capacity TJ9000, celda FCvelocity®-HD85 (85 kW), tren BAE (200 kW), 9.1 kg H2 (350 bar)
2021	Prueba del Primer Yard Truck a H2 en Francia	Validación operacional en terminal en Grand Ouest	[28]	Gaussin, Terminal Grand Ouest, NEOPOLIA	Yard Truck Gaussin APM H2-75T, 230 kW, consumo 10kg/día, 75 ton.
2022	Walmart inicia pruebas de Yard Truck a H2	Validación operacional de un equipo de segunda generación en sus centros de dist.	[29]	Capacity Texas, Walmart	Yard Truck Capacity 2da generación, 10 horas de operación.

En Estados Unidos y Europa, Plug Power se asoció con la francesa Gaussin para diseñar Yard Trucks y vehículos automatizados equipados con celda de combustible Plug Power (ProGen), apuntando a centros logísticos, puertos y aeropuertos, en paralelo a la construcción de la primera red nacional de hidrógeno verde en Norteamérica[25]. El camión posee una capacidad de tracción de 38 toneladas para centros logísticos, integrando un sistema de almacenamiento a 350 bar, ofreciendo hasta 12 horas de operación. Adicionalmente cuentan con una versión modelo APM-H2 de 75 toneladas para puertos[30]. En el 2021, GAUSSIN y el Terminal du Grand Ouest (TGO) firmaron una alianza para probar durante el 2022, en la terminal de contenedores de Montoir (cerca de Saint-Nazaire), el primer tractor pesado portuario a hidrógeno de Francia: el APM H2 75T, con potencia de 230 kW, capacidad de remolque de 75 ton y un consumo cercano a 10 kg H₂/día [28]. La iniciativa, fue coordinada por la red empresarial NEOPOLIA y enmarcada en el proyecto H2 Loire Vallée, la cual buscó validar en condiciones reales el Yard Truck a hidrógeno, optimizar su operación en usos logísticos intensivos, evaluar la aceptación de usuarios e invitar a actores portuarios e industriales vecinos a ensayarlo, con miras a su replicabilidad en grupos como CMA-CGM y Maritime-Kuhn. El proyecto contó con apoyo de las autoridades públicas, como el Consejo Regional de Pays de la Loire. Sin embargo, la empresa Gaussin se declaró en quiebra a fines del 2024[31].



Figura 13. Yard Truck Gaussin Modelo ATM-H2 [38].



Figura 14. Yard Truck Terberg YT203-H2 propulsado con celda Ballard, para ser probado en el puerto de Valencia – Programa H2Ports[32].

En Holanda, Zepp.solutions y Terberg introdujeron el modelo **YT203-H2**, con tanques de hidrógeno a 350 bar y celdas de ElringKlinger, siendo probado en el Puerto de Róterdam con apoyo del esquema de subsidios DKTI-Transport del Ministerio de Infraestructura y Agua, ampliando así el espectro de validaciones europeas [26]. En el

2023, el Terberg YT203-H2 fue construido para ser validado a las condiciones operacionales del Puerto de Valencia, en el marco del programa H2Ports. No obstante, el modelo YT203-H2 fue modificado para operar con un módulo de celdas Ballard de 70 kW y con 4 estanques tipo 3 (12 kg de almacenamiento a 350 bar) para poder operar 6 horas continuas, antes de requerir ser recargado – con tiempos de recarga de 5 a 8 minutos –. Fue probado en el Puerto de Valencia [32].



Figura 15. Yard Truck Capacity construido por el consorcio ZECAP[33]

Finalmente, en California se consolidaron proyectos demostrativos a gran escala. El consorcio ZECAP desarrolló Yard Trucks equipados con una celda de combustible Ballard FCvelocity-HD85 de 85 kW, un tren eléctrico BAE Systems de 200 kW y un almacenamiento de 9,1 kg de hidrógeno a 350 bar. ZECAP tardó 16 meses en el diseño y construcción de los equipos, que fueron puestos a prueba en operaciones reales, a cargo del operador logístico TraPax, durante un año con

apoyo financiero del programa California Climate Investments [27]. El proyecto ha finalizado exitosamente, demostrando que los vehículos pueden operar dos turnos completos por recarga de combustible con excelentes características de torque, aceleración y vibraciones [33]. El resumen de lecciones aprendidas del proyecto se presenta en la **Tabla 9**.

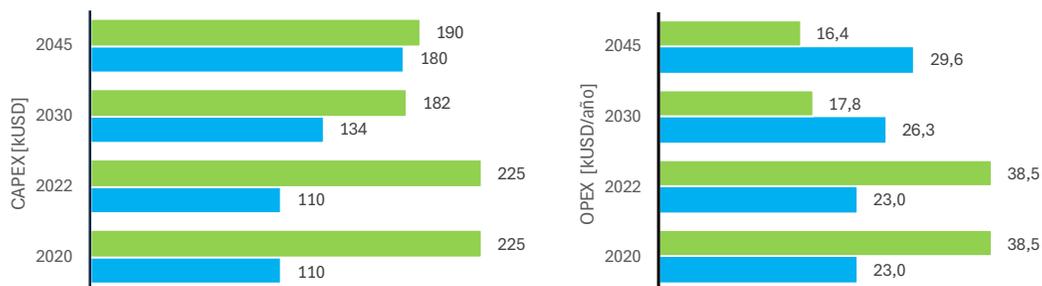


Figura 16. Resumen de Costos de inversión (CAPEX) y de operación anual (OPEX) para Yard Trucks Diésel (Azul) y celdas de combustible (verde).
(elaboración propia a partir de [33])

Adicionalmente, el reporte [33] muestra que, en el corto plazo, la inversión de capital de un yard truck con celda de combustible es aproximadamente el doble de la requerida

para un equipo diésel. No obstante, se proyecta que hacia 2045 dichos valores converjan, acercándose al costo del equipo diésel (Ver **Figura 16**). En cuanto a los costos operacionales anuales —que incluyen combustible y mantenimiento—, inicialmente los equipos con celda de combustible presentan un costo 67% mayor, asumiendo un precio de hidrógeno de 13 USD/kg H₂. Para el 2030, bajo el supuesto de 5 USD/kg H₂, el costo de operación anual del equipo con celda se reduce y resulta 32% inferior al del Yard Truck diésel. En este escenario, se estima un período de recuperación de la inversión cercano a 6 años en 2030 y del orden de 1 año hacia 2040. Concluyendo que, bajo los supuestos del estudio, el diésel mantiene una ventaja económica inicial; sin embargo, en el horizonte de mediano a largo plazo los Yard Trucks con celda de combustible se vuelven más competitivos por su menor costo operativo proyectado – asociado al menor precio del hidrógeno y costo de mantención - y la aceleración del retorno de la inversión.

Tabla 9. Resumen de lecciones aprendidas del consorcio ZECAP en el desarrollo de Yard Trucks híbridos
(elaboración propia a partir de [33])

CATEGORÍA	LECCIÓN APRENDIDA
Aceptación de operadores	La retroalimentación fue muy positiva; los conductores valoraron el par instantáneo, la rápida aceleración, el ambiente silencioso y libre de vibraciones, y el frenado regenerativo, aunque mencionaron preocupaciones sobre la dirección asistida.
Permisos y emplazamiento	El proceso de permisos, ubicación de la estación de combustible e interacción con las autoridades brindó una perspectiva valiosa sobre la logística, complejidad y plazos para asegurar una solución de abastecimiento.
Capacitación de la fuerza laboral	La fuerza laboral necesita educación continua en seguridad de vehículos a hidrógeno para aumentar la seguridad y disipar temores. Su aceptación es clave para promover la tecnología.
Infraestructura de abastecimiento	La infraestructura de hidrógeno requiere desarrollo tecnológico e inversión. Se aprendió de otros combustibles alternativos (ej. GNC) que la infraestructura inadecuada puede socavar la adopción. Las estaciones en sitio son posibles, pero costosas y requieren incentivos.
Escalabilidad	Los tractores terminales a celda de combustible, al adoptarse a mayor escala, pueden generar economías y habilitar la adopción de H ₂ en otras aplicaciones portuarias difíciles de descarbonizar (ej. grúas pórtico, <i>top handlers</i> , <i>straddle carriers</i> automatizados).
Incentivos y demostraciones	Se requieren más demostraciones e incentivos, ya que los fabricantes de equipos portuarios son pequeños y carecen de capacidad financiera para costear desarrollos sin un mercado establecido ni un caso de negocio claro.



Figura 17. Yard Truck a hidrógeno parte del plan de Walmart USA [39].

En junio de 2022, Walmart en Estados Unidos anunció la primera prueba en sus centros de distribución de un Yard Truck con celda de combustible de hidrógeno de segunda generación de la marca Capacity Trucks. El Yard truck se encuentra diseñado para operar hasta 10 horas por recarga, y cuenta con un sistema de reabastecimiento rápido y con menor dependencia de la red eléctrica[29]. La principal ventaja en el uso de estos equipos para Walmart es que puede utilizar la infraestructura existente

de hidrógeno líquido que abastece a sus flotas de grúas horquillas. La red logística de Walmart en Estados Unidos es producto de un acuerdo con Plug Power que contempla el suministro diario de hasta 20 ton de hidrógeno líquido para una flota de 9.500 montacargas en centros de distribución[34].

La **Tabla 10** resume las especificaciones técnicas de pilotos de Yard Truck con trenes de potencia híbridos (Batería + celda de combustible), siendo al parecer un estándar la operación con hidrógeno comprimido a 350 bar. No obstante, al no existir mayor información pública respecto a las características técnicas del Toyota Uno o de la empresa Gaussin (en quiebra), no es posible identificar si puede existir una estandarización de estos equipos.

Tabla 10. Resumen de especificaciones técnicas de los Yard Trucks identificados.

MARCA	CAPACITY	GAUSSIN	TERBERG	TOYOTA
Modelo	H ₂ Zero Emission	ATM H2	YT203-H2	Uno
Autonomía [hrs]	16 ²⁵	12	6	2,5
Almacenamiento [kg]	9 - 15	5	12	s/i
Tipo de estanque	S/i	S/i	III	s/i
Presión de alm. [bar]	350	350	350	s/i
Motor eléctrico [kw]	Dana Mdl eSP502 235 kW	S/i	S/i	s/i
Batería [kWh]	Hasta 85	20	S/i	s/i
Tamaño celda [kW]	45 – 85	230	50 – 70	s/i
Marca celda [kW]	Nuvera ó Ballard	Plug Power	ElringKlinger o Ballard.	Toyota
Dist. Entre ruedas [mm]	2.946	S/i	3.300	s/i
Alto / ancho [mm]	3.416 / 2.590	S/i	3.291 / 2.024	s/i

²⁵ Autonomía combinada entre batería y almacenamiento en hidrógeno.

Configuración	4 x 2	4 x 2	4 x 2	s/i
Capacidad de levante	45	38 – 72	S/i	54
5 ^{ta} rueda [ton]				
Tiempo de carga [min]	10 – 15	S/i	5 - 8	3

4 Conclusiones

El estudio realizado confirma la existencia de prototipos funcionales de Yard Trucks a hidrógeno, con evidencia operativa en pilotos que reportan dos turnos por recarga y autonomías entre ~2,5 y 16 horas, lo que indica factibilidad técnica en ciclos intensivos de patio. La literatura reunida describe experiencias que van desde estudios comparativos de trenes de potencia (diésel vs. celda de combustible/batería) hasta estrategias de gestión de energía (p. ej., programación dinámica y algoritmos evolutivos) que muestran reducciones de consumo de H₂ frente a reglas fijas, además de análisis de sensibilidad en costos de reconversión y decisiones operativas (retrofit/charter) en puertos. En cuanto al liderazgo en materia tecnológica, el documento evidencia que China concentra la mayor producción científica reciente sobre Yard Trucks (en volumen de publicaciones), mientras que Estados Unidos y Europa destacan por la ejecución de pilotos portuarios que aportan datos de operación en condiciones reales – esto logrado por la colaboración entre privados y colaboración pública-privada, por lo que el éxito del desarrollo de la tecnología está ligado a alianzas industriales activas para fabricar, validar y optimizar prototipos.

5 Declaración de Interés

Los autores declaran que no tienen intereses financieros o relaciones personales o haber recibido algún tipo de influencia para incluir marcas, modelos u otra información en este documento.

6 Agradecimientos

A la Gerencia de Capacidades Tecnológicas de CORFO y su programa Tecnológico para el uso y adopción de hidrógeno en la industria chilena. Al estudiante en práctica Alonso Garrido por su motivación y colaboración con información para la creación de este documento. Al Ministerio de Economía y al Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones por su continuo apoyo al Programa.

7 Listado de Figura

Figura 1. Yard Truck referencial.....	2
Figura 2. Mapa de publicaciones relacionadas con Yard Truck por país de origen.....	4
Figura 3. Cantidad de publicaciones relacionadas con Yard Truck por país de origen.	4

Figura 4. Cantidad de publicaciones científicas relacionadas con Yard Truck durante los últimos 10 años.....	5
Figura 5. Representación esquemática del tren de potencia diésel (izq.) y del tren eléctrico con celdas de combustible y batería (der.) [8].....	5
Figura 6. Diagrama de procesos considerados para el yard truck a H2 para el análisis de ciclo de vida realizado por Chang <i>et al.</i> [11].....	7
Figura 7. Comparación de consumos de hidrógeno para un Yard Truck híbrido para tres estrategias de programación (programación dinámica, algoritmo genético y basado en reglas) obtenidos por Wang P. <i>et al.</i> [12].....	9
Figura 8. Consumo de hidrógeno calculado bajo los algoritmos dinámico y genético para diferentes condiciones obtenidas de Wang P. <i>et al.</i> [12].....	10
Figura 9. Costo total de operación en RMB según combinación de yard truck reconvertidos a eléctricos y arrendados a diésel [13].....	11
Figura 10. Esquema del vehículo Yard Truck propuesta en patente US10.514.700B2[14].	12
Figura 11. Esquema del vehículo Yard Truck propuesto en patente JP200503396A [15].	13
Figura 12. Yard Truck Toyota Uno[38].	14
Figura 13. Yard Truck Gaussin Modelo ATM-H2 [38].	16
Figura 14. Yard Truck Terberg YT203-H2 propulsado con celda Ballard, para ser probado en el puerto de Valencia – Programa H2Ports[31].	16
Figura 15. Yard Truck Capacity construido por el consorcio ZECAP[32]	17
Figura 16. Resumen de Costos de inversión (CAPEX) y de operación anual (OPEX) para Yard Trucks Diésel (Azul) y celdas de combustible (verde).....	17
Figura 17. Yard Truck a hidrógeno parte del plan de Walmart USA [39].	19

8 Listado de Tablas

Tabla 1. Resumen de parámetros operacionales típicos de un Yard Truck a diésel [1].	2
Tabla 2. Comparación de trenes motrices para Yard Trucks probados en el Puerto de Salerno (Tabla creada a partir de información de Di Illio et al. [8]).	6
Tabla 3. Comparación del EMS híbrido sin EMS y con el EMS propuesto por Lombardi (Tabla creada a partir de información de Lombardi et al. [9]).	7
Tabla 4. Emisiones reportadas por Chang et al. para un Yard Truck a hidrógeno[11].	8
Tabla 5. Comparación de emisiones producidas por el uso de Yard Trucks para 4 tipos de tecnologías (Tabla creada a partir de información de Chang C. et al.[11]).	8
Tabla 6. Configuraciones de tren de potencia híbrido de celdas de combustible a hidrógeno (HFC) y baterías analizadas por Wang P. et al. [12]	9
Tabla 7. Costos considerados por Zhang et al. para el análisis de composición de una flota de Yard Truck en un puerto “verde” [13].	11
Tabla 8. Reportes de experiencias piloto de Yard Trucks (o Terminal Trucks) a hidrógeno.	15
Tabla 9. Resumen de lecciones aprendidas del consorcio ZECAP en el desarrollo de Yard Trucks híbridos	18
Tabla 10. Resumen de especificaciones técnicas de los Yard Trucks identificados.	19

9 Referencias

- [1] Falcone F. Heavy-Duty Electric Yard Tractor California Energy Commission. Calif Energy Comm 2019.
- [2] Outrider. Three Ps of designing for yard automation. Outrider n.d.
- [3] Martin JR. Economic Benefits of a Yard Management System. Glob Trade 2015.
- [4] Swedberg C. Daimler Truck Factory Boosts Productivity. RFID J 2013.
- [5] Nestlé Chile. Nestlé Chile y ATC inauguran Centro de Distribución para potenciar su estrategia de e-commerce en el país. Nestlé 2023.
- [6] Bohle C. Mercado Libre duplicará número de centros de distribución en regiones y estrena solución logística para comercios asociados. D Financ 2021.
- [7] SNIFA. Sistema Nacional de Información de Fiscalización Nacional. Minist Medioambiente n.d.
- [8] Supermercado al Día. Walmart Chile obtiene aprobación ambiental para ampliación de su Centro de Distribución Lo Aguirre. Supermercadoaldia n.d. <https://supermercadoaldia.cl/2025/04/25/walmart-chile-obtiene-aprobacion-ambiental-para-ampliacion-de-su-centro-de-distribucion-lo-aguirre/> (accessed September 18, 2025).
- [9] Di Ilio G, Di Giorgio P, Tribioli L, Bella G, Jannelli E. Preliminary design of a fuel cell/battery hybrid powertrain for a heavy-duty yard truck for port logistics. *Energy Convers Manag* 2021;243:114423. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114423>.
- [10] Lombardi S, Di Ilio G, Tribioli L, Jannelli E. Optimal design of an adaptive energy management strategy for a fuel cell tractor operating in ports. *Appl Energy* 2023;352:121917. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121917>.
- [11] Liu W, Dou J, Wang P. An energy management strategy based on genetic algorithm for fuel cell hybrid yard truck. *2022 IEEE Int Conf Mechatronics Autom ICMA 2022* 2022:852–7. <https://doi.org/10.1109/ICMA54519.2022.9855916>.
- [12] Chang CC, Huang PC, Tu JS. Life cycle assessment of yard tractors using hydrogen fuel at the Port of Kaohsiung, Taiwan. *Energy* 2019;189:116222. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116222>.
- [13] Wang P, Dou J, Su W, Jiang Z, Shi Y. An energy management strategy based on dynamic programming for fuel cell hybrid trucks in ports. *Int J Hydrogen Energy* 2024;82:123–33. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.356>.
- [14] Zhang Q, Wang S, Zhen L. Yard truck retrofitting and deployment for hazardous material transportation in green ports. *Ann Oper Res* 2024;343:981–1012. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04507-0>.

- [15] Cantrell R, Byrne J, Fretheim E, Millhouse A, High D, McHale B, et al. System and Method for Managing a Vehicle Storage Area. 10514700 B2, 2019.
- [16] Dietmar K, Torsten L. Yard Truck Equipped with electric driving device and fuel cell system and method for driving Yard Truck. JP2005033996A, 2009.
- [17] Port of Long Beach, Vision to demonstrate zero-emission truck. Fuel Cells Bull 2010;2010:2. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(10\)70332-1](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(10)70332-1).
- [18] Vision to evaluate hybrid trucks, build terminal tractor. Fuel Cells Bull 2010;2010:3. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(10\)70041-9](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(10)70041-9).
- [19] Cargotec joins Vision in California ports terminal tractor demo. Fuel Cells Bull 2012;2012:2–3. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(12\)70250-X](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(12)70250-X).
- [20] Vision, Balqon jointly developing fuel cell terminal tractor. Fuel Cells Bull 2012;2012:3–4. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(12\)70281-X](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(12)70281-X).
- [21] Zepp hydrogen-electric terminal tractor moves to Antwerp demo site. Fuel Cells Bull 2021;2021:5–5. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(21\)00311-4](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00311-4).
- [22] Loop Energy fuel cell range-extender yard truck in China trial. Fuel Cells Bull 2017;2017:4. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(17\)30284-5](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(17)30284-5).
- [23] Valencia will be first port in Europe to use hydrogen energy in its container terminals. Fuel Cells Bull 2019;2019:3–3. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(19\)30044-6](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(19)30044-6).
- [24] Milton T, Nikola CEO. Toyota, Fenix demo fuel cell electric utility tractor rig in California. Fuel Cells Bull 2019;2019:3–4. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(19\)30500-0](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(19)30500-0).
- [25] Plug Power, Gaussin target logistics vehicles. Fuel Cells Bull 2020;2020:4–4. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(20\)30559-9](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(20)30559-9).
- [26] Dutch team demos fuel cell terminal tractor. Fuel Cells Bull 2020;2020:5–6. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(20\)30503-4](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(20)30503-4).
- [27] ZECAP project preps for fuel cell yard truck pilot in California. Fuel Cells Bull 2021;2021:4–5. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(21\)00183-8](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00183-8).
- [28] H2 Central. GAUSSIN Announces a Partnership With Terminal Du Grand Ouest (TGO) to Test The First Hydrogen Powered Heavy Handling Tractor in Spring 2022. Hydrog Cent 2021.
- [29] Cortés F. Zero Sum: How Walmart Transportation is Working to Reduce Emissions Now and in the Future. Walmart 2022.
- [30] Faurecia, Gaussin plan logistics vehicles fleet. Fuel Cells Bull 2020;2020:4–5. [https://doi.org/10.1016/s1464-2859\(20\)30500-9](https://doi.org/10.1016/s1464-2859(20)30500-9).

- [31] Chasle R. Liquidation judiciaire: clap de fin pur le constructeur Gaussin. Transp Info 2024.
- [32] Angrisani ML. H2Ports: Future Proofing with fuel cells. Ballard Blog Website 2023.
- [33] Sowa B. Zero- and Near Zero-Emission Freight Facilities Project : Zero Emissions for California Ports (ZECAP). 2023.
- [34] Plug Power. Plug Supplies Walmart with Green Hydrogen to Fuel Retailer’s Fleet of Material Handling Lift Trucks. Plug Power 2022.
- [35] Kalmar. Kalmar Ottawa. Kalmar Termin Tractors n.d.
- [36] EPA. Greenhouse Gas Emissions from typical passenger Vehicle. EPA n.d.
- [37] Sauthoff A, Visweswariah C, Theis T. The PM2.5 Conundrum of Transportation. 100 CURE Organ 2024.
- [38] Toyota. Toyota and Fenix demonstrate first hydrogen fuel cell electric UTR. Toyota 2019.
- [39] Hebda D. Always Lower Emissions. Always. Walmart Makes strides to reduce emission with alternative fuel vehicles. Arkansas Money Polit 2023.