



Transporte Eléctrico de Carga: Análisis de los desafíos para su introducción en Uruguay

ESTRUCTURA METODOLÓGICA PARA HERRAMIENTA DE CÁLCULO DE COSTO TOTAL DE PROPIEDAD



AUTORES Y AGRADECIMIENTOS

RESPONSABLES TÉCNICO - CIENTÍFICOS

Dr. Ing. Martín Tanco – Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Montevideo

Dr. Ing. Daniel Jurburg – director del Centro de Innovación en Organización Industrial (CINOI)

EQUIPO DE INVESTIGACIÓN

Martín Levy – estudiante avanzado de ingeniería industrial

Sebastián Rossi – estudiante avanzado de ingeniería industrial

María Sol Cavallieri – estudiante avanzado de ingeniería industrial

INFORMACIÓN DEL PROYECTO

FSE_1_2019_1_158846

Fondo Sectorial de Energía (Proyecto) – 2019

“Transporte Eléctrico de Carga: Análisis de los desafíos para su introducción en Uruguay”

Duración: octubre 2020 – abril 2022

APOYOS Y COLABORADORES



Contenido

1. Objetivos	4
2. Marco teórico	5
3. Desarrollo de herramienta TCO	7
3.1 Conceptos generales	7
3.2 Precio de compra	8
3.3 Costo de infraestructura	10
3.4 Mantenimiento	11
3.5 Costos de combustibles y electricidad	11
3.6 Seguro y patente.....	12
3.7 Valor residual.....	13
3.8 Descuentos	14
4. Validación de herramienta	16
4.1 Validación con colaboradores.....	16
4.2 Validación con empresa.....	17
4.3 Validación en evento	18
5. Conclusiones	21
Referencias	22

1. Objetivos

En este informe se expone acerca de la herramienta que permite calcular el costo total de propiedad (TCO) para vehículos de carga con tecnologías de combustión convencionales, camiones eléctricos a batería, y camiones con celda de hidrógeno. La herramienta contempla las características generales y específicas de cada camión y de cada tecnología, así como los datos con respecto a la operativa del usuario que desea hacer un cambio de flota. Se consideran las variables económicas influyentes en el país, así como cualquier tipo de beneficio económico promovido por alguna entidad gubernamental que impacte de forma directa o indirecta en los costos asociados a los camiones.

Asimismo, se presentan la validación de la herramienta, la cual fue evaluada por distintos actores pertenecientes al sector del transporte. Se logró involucrar a distintas empresas del rubro y a distintos colaboradores externos e internos al proyecto.

2. Marco teórico

El TCO es un aspecto clave cuando se están comparando vehículos con distintas tecnologías. El costo total de propiedad contempla todos los costos en los que se incurren durante todo el tiempo que lo utilice un usuario, lo que resulta en una herramienta que brinda información clave a la hora de tomar decisiones. Existen muchos estudios que comparan camiones convencionales contra eléctricos a batería, pero la cantidad de estudios que incluyen los camiones con celda de hidrógeno son más reducidos.

Davis y Figliozzi (2013) [1] configuraron un modelo de cálculo de TCO en base a parámetros de recorridos, las características de los vehículos y los costos de propiedad asociados. Los vehículos son categorizados en tres tipos de camiones, donde los modelos eléctricos se comparan con su contraparte a gasoil. Macharis (2013) [2] desarrolla un modelo similar con resultados positivos para los modelos eléctricos en vehículos de carga liviana. Además, destaca las ventajas de adquirir varios camiones simultáneamente, dado que de esta manera se puede diluir el costo de los cargadores en varios vehículos. Feng y Figliozzi (2012) [3] optimizaron el sistema de decisión de reemplazo de una flota por camiones convencionales o eléctricos. Un informe de Deloitte (2019) [4] introduce al hidrógeno en las comparaciones del TCO con resultados positivos para esta tecnología. El estudio proyectado indica que los FCEV tendrán un menor costo de propiedad que los vehículos de motor a combustión interna (ICEV) y los vehículos eléctricos a batería (BEV) en los próximos diez años en una gran variedad de usos. Esto implica una maduración de la tecnología, permitiendo reducir costos y logrando un desarrollo económico de escala. Transport & Environment (2020) [5] compara las tecnologías de batería y celda de hidrógeno en aplicaciones de larga distancia, considerando tanques de hidrógeno con un peso de 70kg comprimido a 700bar. Las aplicaciones de estas tecnologías son muy variadas, pero más que nada son favorecidas en las tareas “stop & go”. Ballard (2021) [6] realiza un análisis de costos de las tres tecnologías para aplicaciones de recolección de basura en Escocia, argumentando que los FCEV cumplen con las necesidades operativas y de performance. Sen et al. (2016) [7] hicieron una evaluación del ciclo de vida de varios camiones de gran peso con tecnologías alternativas, incluyendo en este caso al gas natural líquido. El estudio calcula tanto el costo en los ciclos de vida de los camiones como el impacto ambiental que los vehículos presentan. Lee y Thomas (2017) [8] al igual que Sen et al. hicieron una evaluación económica y

medio ambiental del ciclo de vida de un camión eléctrico de peso mediano en comparación con tecnologías convencionales. Morrison et al. (2018) [9] realizaron una estimación para determinar los costos de vehículos eléctricos y a pilas de combustible. Utilizan el software “Autonomie” del Departamento de Energía de los EE. UU. (DOE) para determinar los costos de los componentes. Tanco (2019) [10] realiza un estudio enfocado en Latinoamérica, aplicando el cálculo del costo de propiedad en cinco países para los BEV y analizando el año donde el punto de equilibrio entre tecnologías será alcanzado.

Como se puede ver, los estudios realizados utilizan variables que dependen de la región en donde se emplea el estudio. Esta herramienta pretende adaptar esta metodología a las características de Uruguay, considerando los costos apropiados y la operativa de los camiones que contempla la región.

3. Desarrollo de herramienta TCO

La herramienta de costo total de propiedad realiza un seccionamiento de los costos por categoría, permitiendo visualizar las categorías que tienen mayor impacto en los costos totales. Los datos solicitados pueden no ser conocidos por el usuario de la herramienta, por lo que esta permite utilizar datos obtenidos de experiencias y literatura, con el fin de lograr una estimación de costos lo más acertada posible. Se introduce además una ventana de supuestos, donde el usuario podrá modificar ciertas variables que impactan principalmente en la evolución de los costos a lo largo de los años, contemplando ajustes en los precios de los combustibles, por ejemplo, o hasta la vida útil de los camiones. Este alto nivel de versatilidad permite que usuarios con distintos niveles de conocimiento puedan interactuar con la herramienta y puedan así obtener información confiable que les facilite tomar una mejor decisión en el futuro.

3.1 Conceptos generales

Como se ha mencionado, los costos de un vehículo no se detienen en la adquisición. En cambio, un administrador de flota debe considerar los distintos costos asociados tanto a la adquisición como a la operación.

Para poder comparar todos los costos asociados al camión en diferentes momentos de su vida útil se utiliza la fórmula financiera del valor actual neto (VAN), tal como se muestra en la Ecuación 1. Esta fórmula actualiza los costos en los que se incursionará en el futuro y los trae al presente, logrando así realizar una mejor evaluación de la inversión:

Ecuación 1: VAN

$$VAN = \frac{I}{(1 + r)^n}$$

Las variables utilizadas son: I , que representa cualquier costo incurrido, n , el año en el cual se incurre al costo y r la tasa de descuento. La tasa de descuento se utiliza para calcular el valor del dinero según el tiempo transcurrido. Funciona como un costo de oportunidad a la compra del camión al poner bajo evaluación el retorno que la inversión podría haber tenido si fuera hecho en otro negocio. Se consideró 8% como valor de la tasa de descuento, que es un número razonable para utilizar.

Para calcular el TCO, se consideraron los costos de compra e infraestructura junto con los costos que se reiteran de forma anual, además del valor residual y los descuentos [1], expresado según la Ecuación 2, siendo CA los costos anuales.

Ecuación 2: Cálculo de TCO

$$TCO = \text{Precio de compra} + \text{Costo de infraestructura} + \sum_n \frac{CA}{(1+r)^n} - \text{Valor residual} - \text{Descuentos}$$

A continuación, se procede a explicar los distintos parámetros considerados dentro del costo de propiedad.

3.2 Precio de compra

La herramienta considera como principal costo de adquisición el del camión. Los demás costos de adquisición refieren a los costos de infraestructura, detallados en la siguiente sección. Este input es presentado junto al peso bruto y la tara del camión. Estos campos se repiten para los casos de un BEV y un FCEV debido a que estos valores pueden variar, especialmente si se le agregan equipos adicionales según la tecnología, sean baterías o tanques de hidrógeno.

En el caso de no conocer el costo de un BEV o un FCEV, se dividieron los costos de los distintos componentes de los camiones, considerando motores, fuentes de energía y elementos característicos de cada tecnología. De esta forma, se puede comparar el costo de un ICEV frente a un BEV y un FCEV, sin considerar los costos de la batería o la celda de hidrógeno. Este costo base fue estimado como porcentaje del precio CIF de un ICEV, en un 98% del precio [10]. Estos costos son detallados a continuación.

En el caso del BEV, se solicita una capacidad de batería, que luego es asociado a un costo por kWh, otorgando así un costo a la batería que deberá agregarse al costo del camión sin batería. Como se ha mencionado en el Capítulo 1, los precios internacionales de los paquetes de baterías son actualmente de 135 USD por kWh, alcanzables para los fabricantes que producen camiones eléctricos a escala [11]. En el caso de no conocer las dimensiones de la batería, esta será estimada a través de los datos operativos solicitados en la herramienta.

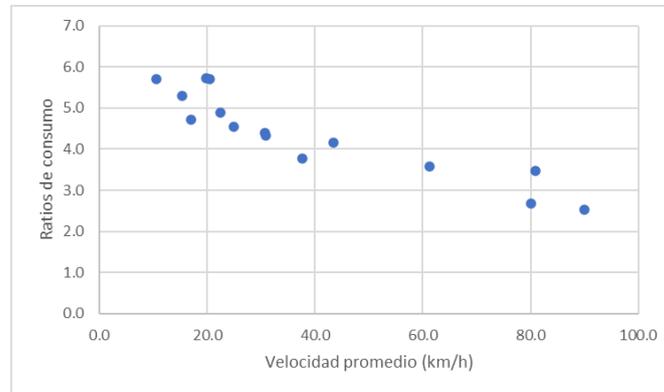
Para llegar a estas estimaciones se comienza definiendo un rendimiento de un camión diésel (Rd) en función del tipo de distribución. Se tomó en cuenta una distribución urbana, regional y de larga distancia. Luego se realizó una segmentación por carga útil, categorizando la capacidad de carga en tres niveles incrementales, como muestra la Tabla 1 [12–14].

Tabla 1: Consumo de combustible en litros de diésel equivalente cada 100km (l/km)

Carga útil (ton)	25	5.5	2.5
Urbano	50,83	26,1	17,6
Regional	41,3	22,3	15,9
Larga Distancia	37,19	20,59	14,9

Si se quisiera comparar las eficiencias de los BEV frente a los ICEV, se deberán comparar los consumos energéticos de cada vehículo. Existe una correlación entre el ratio de consumo (C) entre vehículos y la velocidad promedio con la que se conduce el vehículo. Un estudio de la California Air Resource Board [15] recopila estos datos, los cuales fueron graficados en la Figura 1.

Figura 1: Relaciones de consumo energético en función de la velocidad promedio



A partir de los datos obtenidos, se podrá calcular la capacidad de la batería necesaria para operar el camión. La siguiente fórmula (Ecuación 3) muestra el cálculo de la capacidad de la batería.

Ecuación 3: Cálculo de capacidad de la batería

$$\text{Capacidad de batería (kWh)} = \frac{Rd * F_1}{C} * 1,8 * D$$

Donde:

- Rd = Rendimiento Diésel (l/km)
- F₁ = Factor energético Diésel (kWh/l)
- C = Ratio de consumo
- D = Distancia diaria recorrida (km)

Se considera además un factor de 1,8 que corresponde al producto de dos coeficientes de holgura. En primer lugar, se utiliza un coeficiente de 1,2 debido a los posibles picos de consumo que puedan presentarse. Además, se define un factor de holgura de la batería de 1,5.

La mayor diferencia de costo de un FCEV frente a un BEV o un ICEV se encuentra en el módulo de energía [4]. Para el camión FCEV, se necesita un tamaño de tanque de hidrógeno y la potencia de la celda a utilizar como costos agregados a la base del camión en el caso de no conocer su precio. El costo del sistema de celda puede llegar a constituir el 73% del costo del módulo de energía, estimando un costo promedio de 1.275 USD/kW [4], [6].

El tanque de almacenamiento de hidrógeno puede llegar a considerarse un 15% del costo del módulo. Considerando un costo de 35 USD/kg de capacidad del hidrógeno [4], se logró calcular el costo del tanque de almacenamiento. A partir de los datos de consumo del camión según la carga útil y la potencia de la celda [4,5], se puede estimar un rendimiento promedio (Rh) según el tipo de distribución y la carga útil necesaria. La Tabla 2 muestra estos valores:

Tabla 2: Rendimiento de la celda de hidrógeno en función de la carga útil y la aplicación (kWh/km)

Carga útil (ton)	20	10
Urbano	5,4	2,87
Regional	5	2,53
Larga Distancia	4,1	1,95

De la misma manera que en el cálculo de la batería, se plantea la fórmula (Ecuación 4) del cálculo del tamaño del dispositivo de almacenamiento de hidrógeno, considerando una holgura en el rango diario, además de posibles picos en el consumo.

Ecuación 4: Dimensionamiento del tanque de hidrógeno

$$\text{Tamaño tanque (kg)} = \frac{Rh}{F_2} * 1,8 * D$$

Donde:

- Rh = Rendimiento celda (kWh/km)
- F₂ = Factor energético hidrógeno (kWh/kg) [6]
- D = Distancia diaria recorrida (km)

3.3 Costo de infraestructura

Los costos de infraestructura de los BEV y FCEV deben ser considerados debido a que son un elemento esencial de su operativa.

Para el cálculo del costo de un cargador de camión BEV se estima la potencia necesaria del cargador a partir del tamaño de la batería y del tiempo de carga deseado por el usuario,

y luego se estima un precio de adquisición del puesto de carga de 80 USD/kW [16]. Por lo tanto, el costo de infraestructura de los BEV se muestra en la Ecuación 5.

Ecuación 5: Costo de infraestructura BEV

$$\begin{aligned} \text{Costo Infraestructura} &= kW \text{ necesarios} * 80 \frac{USD}{kW} \\ &= \frac{\text{Capacidad batería}}{\text{Horas de carga}} * 80 \frac{USD}{kW} \end{aligned}$$

El costo de infraestructura de los FCEV puede ser determinado de varias maneras. A continuación, se presentan las dos principales. La primera se basa en adquirir el combustible a través de un centro de distribución externo. Para este caso, se tiene un costo de servicio fijo de 2,62 USD/kg de combustible suministrado. De esta forma, el costo de infraestructura se anexa al combustible consumido. Este costo fue determinado a través de la herramienta Hydrogen Refueling Station Analysis Model (HRSAM), donde se estima un costo de servicio basado en las características de la estación ingresadas en el modelo. Para el caso de Uruguay, se diseñó una estación de tamaño chico, con dispensadores de hidrógeno gaseoso con una compresión de 350 bar.

3.4 Mantenimiento

La herramienta considera los costos de mantenimiento anuales como input, pero además pueden ser calculados en base a los costos de mantenimiento de un ICEV. Las relaciones encontradas fueron que los costos de mantenimiento de un BEV están un 39,5% por debajo de un ICEV [5,6] mientras que los costos de mantenimiento de un FCEV se encuentran un 10% por encima de los costos de mantenimiento de un ICEV. Este costo es afectado además por la inflación anual, la cual fue estimada en un 9% [17].

3.5 Costos de combustibles y electricidad

El costo del gasoil es una variable que puede ser directamente introducida en la herramienta. Debido a la dificultad en predecir los precios de los combustibles, el incremento anual fue estimado según los incrementos de los últimos cinco años [18].

El costo de electricidad es determinado a partir del pliego tarifario emitido por UTE en enero de 2021, en el cual se debe establecer el tipo de contrato y un horario de carga a partir de lo cual se obtiene el costo por kWh recargado. Para estimar la tasa de incremento anual de la electricidad se utilizaron los costos de los últimos cinco años [18].

En la Tabla 3 se muestran los incrementos en los costos de gasoil y electricidad desde 2017 a 2021. El valor promedio de los incrementos en pesos fue utilizado como incremento anual de cada variable respectivamente en el cálculo.

Tabla 3: Aumento de precios en electricidad y gasoil en los últimos 5 años

	Aumento electricidad	Aumento gasoil 50 ppm
2017	12%	8%
2018	3%	-3%
2019	6%	0%
2020	0%	0%
2021	16%	12%
Promedio	7.29%	3.35%

Es complejo determinar el costo del hidrógeno dado que en Uruguay todavía no se está comercializando. Se evaluaron los precios del hidrógeno verde en varias partes del mundo y se estimó un precio aproximado de 9 USD/kg. Además, se espera una caída en el precio del combustible a raíz de mejoras en su producción, por lo que se integró una tasa anual de mejora del 1% en el precio del hidrógeno para el cálculo [4,19]. La Ecuación 6 muestra el costo anual de combustible, donde r representa la tasa de descuento mencionada anteriormente.

Ecuación 6: Costo anual del hidrógeno

$$\text{Costo combustible anual} = \frac{\text{Costo combustible} * \text{Km anuales} * \text{Rendimiento}}{(1 + r)^{\text{año}}}$$

3.6 Seguro y patente

El pago de patente se considerará el mismo en porcentaje para los precios de los camiones de cualquier tecnología. Se calcula un costo del 1,3% del valor del vehículo como coste anual de patente [20].

El cálculo del seguro varía según el modelo, tamaño, empresa aseguradora, y otras variables que afectan este cálculo. Por lo tanto, para estimar el costo de seguro se tuvo en cuenta un listado de camiones ICEV de distintos modelos y tamaños, donde se logró estimar un porcentaje promedio correspondiente al valor del camión. Además, se pudo observar que estos valores no variaron de forma significativa con los camiones de otras tecnologías. Con respecto al costo del seguro de un FCEV, se realizaron consultas a distintas compañías aseguradoras con el fin de determinar el porcentaje correspondiente al seguro. Pese a que no se logró obtener un valor conciso de este parámetro, se logró

adjudicar un porcentaje similar al de los BEV, considerando el mismo factor evaluado por las aseguradoras, siendo este el de tecnologías renovables.

Tabla 4: Relación entre el costo del seguro y el precio del camión

Modelo ICEV	Precio (USD)	Seguro (USD)	Porcentaje
VW Worker 17-230	60.000	1.070	1.8%
VW New Constellation 15-190	56.000	977	1.75%
VW Delivery 9-170	38.000	593	1.56%
Promedio	-	-	1.70%
Modelo BEV			
BYD T6	87.000	1.009	1.16%

3.7 Valor residual

Se consideró un valor estimado de vida útil para cada tipo de camión. Estos valores son 15 años para un ICEV, 10 años para un BEV y 12 años para un FCEV, [2], [21], [4]. Este valor es luego comparado con los años indicados por el usuario hasta el siguiente cambio de flota. Durante este tiempo se le aplica una depreciación lineal al valor del camión hasta llegar a la fecha de cambio de flota.

Para los BEV, se hace una importante diferenciación entre la vida útil del camión y la de la batería, especificando un cálculo distinto para cada elemento. El camión sufrirá el método de depreciación antes mencionado, considerando un valor de vida útil más elevado que si se consideraran los elementos en su conjunto.

El cálculo de la vida útil de la batería se realiza a través de la cantidad de ciclos anuales que realiza la batería. Se considera un ciclo completo a la descarga y carga completa de la batería. La cantidad de ciclos que una batería puede ejecutar antes de considerarse como desgastada varía según el tipo de batería con el que se esté operando. Por lo tanto, este valor puede ser modificado en la sección de supuestos. El cálculo de la vida útil de la batería se define mediante la Ecuación 7.

Ecuación 7: Vida útil de la batería

$$Vida\ útil\ batería = \frac{Ciclos\ totales * Tamaño\ batería}{Consumo\ medio * Distancia\ anual}$$

Para realizar el cálculo del valor residual de la batería, se debe tener en cuenta, además, la garantía que presenta frente al fabricante. Este valor puede representarse de dos maneras: la distancia total recorrida, o los años transcurridos desde la compra. Se deberán

comparar estas restricciones frente a la vida útil de la batería, con el fin de determinar si se deberá incluir dentro de los costos, una segunda batería. Una vez determinado esto, se volverá a realizar el cálculo de vida útil de la batería hasta el año donde se realice el cambio de flota.

3.8 Descuentos

El sistema de descuentos utilizado en la herramienta consta del uso de la Comisión de Aplicación de la Ley de Inversiones (COMAP), la cual permitirá a la empresa aplicante beneficiarse de exoneraciones fiscales sobre las inversiones efectivamente realizadas, a partir del ejercicio económico en que se presenta el proyecto, siempre y cuando la empresa haya generado renta neta fiscal.

Las exoneraciones de impuestos se definen a través de una matriz de indicadores, en la cual cumpliendo ciertos criterios se otorgan distintos grados de exoneración. Estos criterios están asociados a logros alcanzados en distintas temáticas, como lo son: generación de empleo, descentralización, capital invertido, inversión en elementos que utilicen energías renovables. La exoneración también depende de la magnitud de los logros alcanzados.

Como ya mencionado anteriormente, para poder considerar este descuento en la herramienta se deben hacer algunos supuestos previos. Estos supuestos cubren, por un lado, el hecho que los descuentos se realizan de forma indirecta a través de la exoneración impositiva, y, por otro lado, que el monto de la inversión total del proyecto puede ser de una magnitud muy alta, opacando así cualquier tipo de costo que presente el camión en su ciclo de utilización. En primer lugar, se considera el costo del camión como la inversión total, enfocando el costo en su precio de adquisición y generando el porcentaje de descuento correspondiente. En segundo lugar, este descuento será aplicado al mismo precio de adquisición del camión. Estas premisas permitieron visualizar el impacto que tienen estos beneficios en los costos de propiedad de los eléctricos, permitiendo además realizar una comparación justa con su contraparte convencional a combustión.

Para el cálculo del descuento aplicado en la herramienta se considera un rango posible de descuento desde un 30% hasta un 37,8% sobre la inversión, dependiendo de la relación entre el precio del camión y la inversión total. Si se considera entonces el costo del camión como la inversión total, el descuento será el máximo, pero si en otra circunstancia se quisiera considerar una inversión mayor, se aplicaría el cálculo de la relación indicado en la Tabla 5.

Tabla 5: Descuento aplicado según relación de inversión

Relación	0.5	0.25
Descuento	37.8%	30%

Siguiendo el razonamiento mencionado, si la relación se encuentra por debajo de 0.25, no corresponde ningún descuento. Luego, los valores son interpolados hasta llegar a una relación de 0,5, donde se otorga el descuento máximo.

4. Validación de herramienta

La validación de la herramienta TCO fue realizada principalmente en tres instancias. En primer lugar, en una etapa de desarrollo se realizaron reuniones con diversos actores del sector y colaboradores tanto para validar la metodología como para mejorarla. Posteriormente, se validó la estimación de costos de la herramienta con una empresa que recientemente había adquirido un camión eléctrico. Finalmente, en el evento Expocarga 2021, se presentó la herramienta en el Foro de Movilidad y se hizo una validación con dos actores del sector adicionales.

4.1 Validación con colaboradores

Se obtuvo la colaboración de dos instituciones en la fase de desarrollo de la herramienta. Por un lado, SEG Ingeniería, a través de una reunión virtual e intercambio de correos electrónicos validó la metodología de la herramienta y aportó mejoras en cuanto a las proyecciones y suposiciones futuras que se tienen en cuenta para calcular la inversión.

Las principales mejoras que se realizaron luego del intercambio con SEG Ingeniería fueron:

- Se ajustó el dimensionamiento de la batería en cuanto a sus limitaciones y se diferenció la vida útil de la batería con respecto a la del camión en sí, considerando los deterioros que presentan en un tiempo más adecuado.
- Los descuentos otorgados por participar en un proyecto de inversión fueron considerados también para el caso del hidrógeno, considerando al camión como parte total de la inversión.

Por otro lado, se obtuvo el apoyo de IREC (Catalonia Institute for Energy Research), específicamente de Marc Torrell, que es especialista en la tecnología de hidrógeno. Con él, se validó la metodología utilizada para estimar los costos totales de propiedad asociados a un camión con celda de combustible de hidrógeno a la vez que proporcionó literatura para mejorar la precisión de los datos utilizados.

Las principales mejoras que se realizaron luego del intercambio con IREC fueron:

- Se ajustaron los costos del hidrógeno para años futuros en base a proyecciones internacionales del precio. Se creó un supuesto en la herramienta que corrige el valor según el año.
- Se mejoró la estimación del costo de infraestructura del hidrógeno, asociándolo a un costo de servicio según la cantidad de combustible consumido por el camión.

4.2 Validación con empresa

Luego de la fase de desarrollo de la herramienta y de la validación con colaboradores, se trabajó con una empresa para utilizar la herramienta con datos reales y verificar que los resultados obtenidos, por un lado, se acerquen a los costos reales ya incurridos y, por otro lado, la metodología de estimación de costos futuros sea validada. El contacto con la empresa ya había sido realizado previamente para el monitoreo de su camión eléctrico, lo cual fue tratado en el Capítulo 4. Cabe destacar que el equipo realizó numerosos esfuerzos para validar la herramienta con una segunda empresa. A pesar de que se logró tener algunos de los costos reales a partir de los cuales se intentó validar la herramienta, no se logró obtener comentarios ni feedback de parte de la empresa. A continuación, se detalla el proceso realizado para validar y evaluar la compra de un camión eléctrico.

En primer lugar, se realizó la recopilación de datos técnicos del camión BYD T6A a analizar, los datos operativos de la distribución y los datos económicos. Posterior a la recopilación de información, se analizó la metodología de cálculo de la herramienta y los supuestos tomados en cuenta para la estimación de costos.

Se observó que, en el camión eléctrico, los costos con mayor predominancia son los asociados a la depreciación. Por este motivo se analizó en detalle este cálculo y se identificó una oportunidad de mejora de la herramienta. En principio, el valor residual del camión se calculaba en función de una vida útil en años tomada de literatura, y esta vida útil era independiente de los kilómetros recorridos anuales. Con la intención de calcular la vida útil de la batería en función de los ciclos teóricos de vida útil y de la cantidad de ciclos diarios realizados, se organizó una reunión con los proveedores del camión, de la cual se obtuvo información acerca de los ciclos teóricos de la batería.

El precio de compra del camión eléctrico fue considerado como el precio del modelo equivalente en plaza (BYD T45C01) debido a que el BYD T6A ya no se comercializa en Uruguay.

Se tomaron las siguientes suposiciones para la comparación:

- Vida útil del camión diésel: 15 años
- Vida útil del camión eléctrico sin la batería: 10 años
- Cambio de flota: 8 años
- Variables económicas actualizadas en diciembre 2021
- Los precios de los camiones corresponden a los precios de lista CIF

- No se incluye el costo del furgón refrigerado en los precios de los camiones ni el costo operativo de refrigerarlo
- Se considera una depreciación lineal
- El costo de mantenimiento de los camiones convencionales se estimó a partir del camión VW Delivery 9-170, que pertenece a la flota de la empresa y cuyo costo de mantenimiento fue calculado en base a un histórico desde 2019
- El análisis es únicamente económico, por lo que no se tienen en cuenta restricciones técnicas ni características operativas

Las características del camión eléctrico utilizado para la comparación se pueden ver en la Tabla 6.

Tabla 6: Características del camión

Característica	BYD T45C01
Peso bruto (ton)	6,495
Tara (ton)	2,8
Carga útil (ton)	3,695
Capacidad de la batería (kWh)	99
Tipo de batería	LFP
Horas de carga diarias	1,2
Autonomía (km)	210
Ciclos de la batería	2000
Garantía camión	3 años o 150.000km
Garantía batería	5 años o 500.000km
Precio (USD)	87000

A partir de estos datos de entrada se obtuvo un desglose de costos con la herramienta TCO, considerando un período de cambio de flota de 8 años.

Habiendo implementado las mejoras identificadas, se presentaron los resultados de la herramienta en una reunión con la empresa, a partir de la cual se dio por validada la herramienta.

4.3 Validación en evento

Luego de haber desarrollado la herramienta, validado con expertos en la temática y validado con una empresa, se presentó la herramienta en el primer evento de transporte de carga en Uruguay: Expocarga 2021. Todo el equipo de investigación asistió al evento los días 2 y 3 de diciembre de 2021.

Los objetivos iniciales de asistir al evento fueron principalmente dos. En primer lugar, se quiso dar a conocer el proyecto y la herramienta específicamente. Para esto, se participó

del foro de “MOVILIDAD 4.0: Por una Movilidad Eficiente y Sostenible en Uruguay” con una presentación acerca de los resultados del monitoreo de dos camiones eléctricos y de la aplicación del TCO en ambas empresas. Además, en el stand se entregaron folletos del proyecto y se informó a interesados sobre este. El segundo objetivo fue validar la herramienta TCO haciendo aplicaciones en vivo con los interesados en el stand. Para esto, se llevó una computadora con una versión local de la página web y una carpeta con un listado de camiones convencionales y eléctricos disponibles en el mercado para hacer la prueba. De esta forma, ya sea el interesado o un miembro del equipo pudiera, con los datos técnicos y con los datos operativos de la empresa, ver la comparación de costos TCO entre un camión convencional y un eléctrico equivalente. Los resultados posteriormente podían ser enviados en formato pdf al interesado por email.

Se define a la experiencia vivida en el evento como positiva, en donde se destaca la posibilidad de haber podido interactuar con referentes en la temática, definir y explicar el trabajo realizado y finalmente, haber tenido la posibilidad de buscar opciones de mejora para la herramienta.

Se destacan dos interacciones con actores sector. Por un lado, posterior a la presentación en el foro de movilidad, se tuvo un intercambio con los representantes de Autodata, una empresa asesora en el sector automotriz. Además de felicitar al equipo de trabajo, cuestionaron la forma de cálculo de los valores residuales de los camiones eléctricos y convencionales, diferenciando entre el valor real y el valor contable. Por otro lado, se destaca la interacción con David Rulevas, consultor comercial en Volkswagen Camiones y Ómnibus en Brasil, quien se mostró interesado en el estudio TCO. Destacó la importancia del análisis TCO para evaluar la compra, especialmente cuando el camión eléctrico cuesta aproximadamente tres veces más que su versión con combustible convencional. Luego de presentarle la herramienta y de realizar pruebas con él, David Rulevas detalló posibles mejoras en cuanto a la cuantificación de costo de infraestructura y las capacitaciones.

En función de las interacciones mencionadas previamente, a continuación, se listan las mejoras propuestas por los distintos actores:

1. La compra de camiones eléctricos debe dividirse en tres casos distintos:
 - a. Cuando se compra un único camión eléctrico por primera vez.
 - b. Cuando ya se tiene un (o más de un) camión eléctrico y se quiere evaluar la compra de uno adicional.

c. Cuando inicialmente se quiere evaluar la compra de más de un camión. La importancia de esta clasificación radica principalmente en los costos de infraestructura a los cuales se va a incurrir.

2. Deben considerarse costos de capacitación. Debe realizarse una capacitación a los conductores en la forma de manejo y para que conozcan la tecnología y que sepan actuar frente a imprevistos o catástrofes. Además, en la empresa debe haber una persona con conocimientos eléctricos para maniobrar en el camión si fuera necesario.
3. Deben considerarse los costos de equipos básicos para maniobrar con altas tensiones en el camión eléctrico.
4. Debe realizarse con mayor precisión la estimación de los valores residuales de los camiones. Si bien realizar una depreciación lineal es correcto desde el punto de vista contable, aún es incierto el valor residual y la tasa de depreciación que pueda tener el camión eléctrico.

Además de sugerir estas mejoras, los expertos elogiaron al equipo del proyecto por la herramienta desarrollada, destacando su utilidad y validez aún sin implementar las mejoras sugeridas.

5. Conclusiones

A modo de resumen, la validación de la herramienta consistió en varias etapas, desde el intercambio con los colaboradores en las fases iniciales, a la validación con un caso práctico hasta la validación y recomendación de mejoras por parte de dos expertos. En las dos primeras etapas se realizaron los ajustes necesarios a la herramienta mientras que, en la última etapa, se detalló el procedimiento futuro para lograr una versión final de la herramienta.

Se considera que el objetivo fue alcanzado de manera exitosa por varios motivos. En primer lugar, la herramienta fue revisada por dos expertos en movilidad eléctrica e hidrógeno. Por otro lado, se aplicó la herramienta en una empresa, en donde muchos costos ya fueron incurridos por esta, de manera que se pudo ver que la herramienta se ajustaba a los costos reales. Finalmente, se obtuvo la revisión de otros dos expertos del sector, quienes aportaron su punto de vista en las áreas competentes.

Por último, se destaca la importancia de las revisiones llevadas a cabo para obtener un producto aceptado y respaldado. Además, a raíz de la validación de la herramienta, se resalta el uso de la herramienta como principal elemento para la toma de decisiones de una empresa que busca adquirir un nuevo camión eléctrico.

Referencias

1. Davis BA, Figliozzi MA. A methodology to evaluate the competitiveness of electric delivery trucks. *Transp Res Part E Logist Transp Rev* [Internet]. 2013 Jan [cited 2021 Feb 8];49(1):8–23. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1366554512000658>
2. Macharis C, Lebeau P, Van Mierlo J, Lebeau K. Electric vehicles for logistics: a total cost of ownership analysis. *2013 World Electr Veh Symp Exhib*. 2013;6:1–10.
3. Feng W, Figliozzi MA. Conventional vs Electric Commercial Vehicle Fleets: A Case Study of Economic and Technological Factors Affecting the Competitiveness of Electric Commercial Vehicles in the USA. *Procedia - Soc Behav Sci*. 2012 Jan 1;39:702–11.
4. Deloitte China, Ballard. *Fueling the Future of Mobility Hydrogen and fuel cell solutions for transportation*. Vol. 1, Financial Advisory. 2019.
5. Transport & Environment. *Comparison of hydrogen and battery electric trucks*. 2020;(June):1–14. Available from: https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2020_06_TE_comparison_hydrogen_battery_electric_trucks_methodology.pdf
6. Ballard AE. *Zero Emission - Fuel Cell Electric Refuse Collection Vehicles*. 2021.
7. Sen B, Ercan T, Tatari O. Does a battery-electric truck make a difference? e Life cycle emissions, costs, and externality analysis of alternative fuel-powered Class 8 heavy-duty trucks in the United States. 2016 [cited 2021 May 26]; Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.046>
8. Lee DY, Thomas VM. Parametric modeling approach for economic and environmental life cycle assessment of medium-duty truck electrification. *J Clean Prod* [Internet]. 2017;142:3300–21. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.139>
9. Morrison G, Stevens J, Joseck F. Relative economic competitiveness of light-duty battery electric and fuel cell electric vehicles. *Transp Res Part C Emerg Technol*.

2018;87(January 2018):183–96.

10. Tanco M, Cat L, Garat S. A break-even analysis for battery electric trucks in Latin America. *J Clean Prod* [Internet]. 2019;228:1354–67. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.168>
11. Forbes. Cheap Batteries Could Soon Make Electric Freight Trucks 50% Cheaper To Own Than Diesel [Internet]. 2021 [cited 2021 Oct 27]. Available from: <https://www.forbes.com/sites/energyinnovation/2021/03/16/plummeting-battery-prices-mean-electric-freight-trucks-could-be-50-cheaper-to-own-than-diesel/?sh=2b711f14418c>
12. IEA International Energy Agency. *The Future of Trucks – Implications for Energy and the Environment*. Int Energy Agency. 2017;
13. Schubert, R., Chan, M., and Law K. *Commercial Medium- and Heavy-Duty Truck Fuel Efficiency Technology Study – Report #1*. Re [Internet]. 2015;2015(June):302. Available from: <https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/812146-commercialmdhd-truckfuefficiencytechstudy-v2.pdf>
14. Harrington W, Krupnick A. *Improving Fuel Economy in Heavy-Duty Vehicles*. SSRN Electron J. 2012;(March).
15. California Environmental Protection Agency, California Air Resources Board (CARB). *Battery Electric Truck and Bus Energy Efficiency Compared to Conventional Diesel Vehicles*. 2018;(May):23. Available from: <https://www.arb.ca.gov/msprog/actruck/docs/HDBEVefficiency.pdf>
16. DiNello S. *How much do EV charging stations cost?* [Internet]. 2021 [cited 2021 Sep 2]. Available from: <https://futureenergy.com/how-much-do-ev-charging-stations-cost/#:~:text=Level one%2C or residential chargers,chargers to handle the load.>
17. Instituto Nacional de Estadística. *Índice de Precio del Consumo (IPC)* [Internet]. 2022 [cited 2022 Feb 13]. Available from: <https://www.ine.gub.uy/indicadores?indicadorCategoryId=11421>
18. Instituto Nacional de Estadística. *Precios de servicios públicos* [Internet]. 2021

[cited 2021 Oct 8]. Available from: <https://www.ine.gub.uy/web/guest/precios-de-servicios-publicos>

19. Roland Berger. Study Report: Fuel Cells Hydrogen Trucks. Africa's potential Ecol Intensif Agric [Internet]. 2020;53(9):1689–99. Available from: <https://www.fch.europa.eu/publications/study-fuel-cells-hydrogen-trucks>
20. SUCIVE C de I. Normas de determinación del tributo de patente de rodados. 2020;1–18.
21. Lebeau K, Lebeau P, Macharis C, Van Mierlo J. How expensive are electric vehicles? A total cost of ownership analysis. 2013 World Electr Veh Symp Exhib EVS 2014. 2014;1–12.

Centro de Innovación en Organización Industrial (CINOI)

Facultad de Ingeniería, Universidad de Montevideo. Luis P. Ponce
1307, 11300 Montevideo, Uruguay

cinoi@um.edu.uy

