



# Entregable 2

## Informe del análisis de Costo Total de Posesión (CTP) de los vehículos eléctricos y escenarios de penetración

Creación de condiciones habilitadoras del ecosistema hidrógeno en aplicaciones de movilidad eléctrica

Documento elaborado por:

## **HINICIO**

*Calle 85 #19b-31, Bogotá, Colombia*

### **Punto de contacto**

**Patrick Maio**

CEO

+54 911 3646 3219

[patrick.maio@hinicio.com](mailto:patrick.maio@hinicio.com)

*Bogotá, 03 de Junio de 2020*

## CONTENIDO

Lista de Tablas .....	6
Lista de Figuras .....	7
Listado de Abreviaciones.....	9
Resumen Ejecutivo.....	10
Alcance y objetivos del informe.....	17
1. Costo Total de Posesión (CTP).....	18
1.1. Definición del Costo Total de Posesión .....	18
1.2. Componentes del CTP .....	18
1.3. Consideraciones iniciales sobre los vehículos eléctricos.....	20
Autonomía.....	20
Disponibilidad de los vehículos .....	22
Capacidad de transporte de pasajeros.....	24
Capacidad de transporte de carga .....	24
1.4. Supuestos de cálculo .....	25
Costo de adquisición.....	25
Decrecimiento del CAPEX de BEV y FCEV.....	28
Cambio de batería (BEV) o celda de combustible (FCEV) .....	29
Costos Administrativos (impuestos, pólizas, financiamiento) .....	29
Mantenimiento.....	33
Energéticos.....	35
Kilometraje anual.....	37
Aumento en la eficiencia de los sistemas de celda de combustible .....	38
1.5. Resultados del CTP.....	39
Camiones de carga pesada .....	39
Buses.....	41
Vehículos de carga ligera.....	43
Mini buses.....	44
Vehículos ligeros.....	45
1.6. Sensibilidad a las principales variables que influyen en el CTP .....	46
Kilometraje .....	46
Incentivos fiscales.....	47

Costo nivelado de hidrógeno.....	49
Incertidumbres en evolución de parámetros clave .....	51
2. Escenarios de Penetración de BEV y FCEV en Costa Rica a 2030 y 2050.....	53
2.1. Contexto y consideraciones para la producción de escenarios.....	53
Supuestos comunes .....	53
Supuestos específicos por escenario .....	55
2.2. Escenario Business as Usual .....	56
2.3. Escenario Hydrogen Breakthrough.....	58
2.4. Escenario Battery Breakthrough .....	60
3. Evaluación de co-beneficios de un impulso a la sustitución tecnológica.....	62
3.1. Evaluación de co-beneficios identificados bajo el escenario Business as Usual	62
3.1.1. Reducción de emisiones de GEI.....	62
3.1.2. Reducción de emisión de contaminantes .....	63
3.1.3. Ahorro en consumo de combustibles fósiles .....	67
3.1.4. Beneficios sociales .....	67
3.1.5. Número de baterías que llegan al final de su vida útil.....	68
4. Conclusiones y recomendaciones.....	71
4.1 Conclusiones.....	71
4.2 Recomendaciones para mejorar la costo-efectividad de los vehículos eléctricos y promover su adopción acelerada .....	73
Anexo 1 – Colección de gráficos del CTP .....	76
Vehículos de carga pesada.....	76
Buses .....	77
Vehículos de carga ligera .....	78
Mini buses .....	79
Vehículos ligeros de uso comercial (taxi/uber) .....	80
Vehículos ligeros de uso particular .....	81
Anexo 2 – Colección de gráficos de Escenarios de Penetración .....	82
Escenario de penetración Business as Usual .....	82
Escenario de penetración Hydrogen Breakthrough .....	84
Escenario de penetración Battery Breakthrough .....	86
Anexo 3- Metodología de cuantificación de co-beneficios .....	88

Reducción de emisión de GEI.....	88
Reducción de emisión de contaminantes.....	89
Ahorro en consumo de combustibles fósiles.....	89
Beneficios sociales.....	89
Anexo 4 Costo de Abatimiento .....	92
Definición y metodología de cálculo del Costo de Abatimiento .....	92
Resultados y conclusiones del Costo de Abatimiento .....	92
Bibliografía .....	94

## Lista de Tablas

Tabla 1-1 Vehículos de carga pesada estudiados y costo de adquisición .....	25
Tabla 1-2 Buses estudiados y costo de adquisición .....	26
Tabla 1-3 Vehículos de carga ligera estudiados y costo de adquisición .....	26
Tabla 1-4 Mini buses estudiados y costo de adquisición .....	27
Tabla 1-5 Vehículos de pasajeros estudiados y costo de adquisición .....	27
Tabla 1-6 Proyección del decremento en el CAPEX de vehículos eléctricos en Costa Rica <sup>[34]</sup> .....	28
Tabla 1-7 Costo y vida útil de las baterías y celdas de combustible automotrices .....	29
Tabla 1-8 Impuesto selectivo de consumo y aranceles a la importación para vehículos en Costa Rica .....	30
Tabla 1-9 Impuesto a la tenencia vehicular en Costa Rica <sup>[24]</sup> .....	31
Tabla 1-10 Costo de financiamiento de vehiculos en Costa Rica <sup>[25],[26]</sup> .....	32
Tabla 1-11 Costo del mantenimiento del mini bus convencional en Costa Rica <sup>[28]</sup> .....	33
Tabla 1-12 Costo del mantenimiento de los mini buses eléctrico a batería y de celda de combustible .....	34
Tabla 1-13 Costo del mantenimiento de vehículos ligeros en Costa Rica <sup>[27]</sup> .....	34
Tabla 1-14 Proyecciones del precio de la gasolina y el diésel en Costa Rica <sup>[29]</sup> .....	35
Tabla 1-15 Proyecciones del precio de electricidad en Costa Rica <sup>[30]</sup> .....	36
Tabla 1-16 Resultados del cálculo de LCOH para Costa Rica .....	37
Tabla 1-17 Recorrido anual promedio de los vehículos en Costa Rica <sup>[31],[32]</sup> .....	38
Tabla 1-18 Evaluación del impacto de la Ley 9518 .....	48
Tabla 2-1 Evolución del LCOH utilizado en cada escenario de penetración .....	56
Tabla 3-1 Empleos nuevos estimados de la movilidad eléctrica .....	68

## Lista de Figuras

Figura 1-1 CTP 2020 de vehículos ligeros comerciales .....	19
Figura 1-2 Proyección de CTP de vehículos de carga ligera .....	20
Figura 1-3 Densidad energética de las baterías de litio y de los sistemas de hidrógeno comprimido .....	21
Figura 1-4 Autonomías de BEV y FCEV para diferentes categorías de vehículos .....	22
Figura 1-5 Comparación entre disponibilidades de HDV y buses BEV y FCEV .....	23
Figura 1-6 Comparación entre la capacidad de transporte de pasajeros en buses BEV y FCEV .....	24
Figura 1-7 Comparación entre la capacidad de carga en HDV de BEV y FCEV .....	25
Figura 1-8 Proyección de CTP de vehículos de carga pesada para trayectos de >300km/día .....	40
Figura 1-9 Proyección del CTP 2020 - 2050 de HDV expresado en USD/km ton .....	41
Figura 1-10 Proyección del CTP de buses para recorridos de larga distancia .....	42
Figura 1-11 Proyección del CTP de buses para recorridos de corta distancia en dólares por kilómetro .....	42
Figura 1-12 Proyección del CTP de buses para recorridos de corta distancia en dólares por kilómetro y pasajero transportado .....	43
Figura 1-13 Proyección de CTP para vehículos de carga ligera .....	44
Figura 1-14 CTP de mini buses con diferentes trenes motrices en 2020 .....	45
Figura 1-15 Proyección del CTP de vehículos ligeros particulares y comerciales .....	46
Figura 1-16 Análisis de sensibilidad por cambio de kilometraje en LDV y vehículos de pasajeros comerciales .....	47
Figura 1-17 Análisis de sensibilidad por exoneración al 100% de impuestos a los vehículos eléctricos .....	49
Figura 1-18 Análisis de sensibilidad al LCOH en vehículos de carga pesada. ....	50
Figura 1-19 LCOH para la paridad de HDV de tipo FCEV con ICEV y BEV. ....	51
Figura 1-20 Incertidumbre del CTP de buses asociada al CAPEX de BEV y FCEV .....	52
Figura 2-1 Proyección de crecimiento de flota vehicular en Costa Rica (2020-2050) ...	54
Figura 2-2 Proyección de penetración BAU de vehículos de carga pesada .....	57
Figura 2-3 Proyección de penetración BAU de buses .....	57
Figura 2-4 Proyección de penetración BAU de vehículos ligeros comerciales .....	58
Figura 2-5 Proyección de penetración HB de vehículos de carga pesada .....	58
Figura 2-6 Proyección de penetración HB de buses .....	59
Figura 2-7 Proyección de penetración HB de vehículos ligeros .....	59
Figura 2-8 Proyección de penetración BB de vehículos de carga pesada .....	60
Figura 2-9 Proyección de penetración BB de buses .....	60
Figura 2-10 Proyección de penetración BB de vehículos ligeros comerciales .....	61
Figura 3-1 Factores de emisión de los vehículos eléctricos a 2030 y 2050 .....	62
Figura 3-2 Ahorro en emisiones de GEI sector transporte .....	63
Figura 3-3 Ahorro en emisión de contaminantes por segmento 2030 .....	64
Figura 3-4 Ahorro en emisión de contaminantes por segmento 2050 .....	65

Figura 3-5 Ahorro en emisiones de contaminantes sector transporte (CO, NOx,COV) .66

Figura 3-6 Ahorro en emisiones de contaminantes sector transporte (PM10, PM2.5, SO2) .....66

Figura 3-7 Ahorro en consumo de combustible para el total de la flota de VEs .....67

Figura 3-8 Flota de VE en 2050 y acumulado de baterías que llegan al final de su vida útil .....69

Figura 3-9 Baterías desechadas en Costa Rica al final de su vida útil a 2050 bajo los tres escenarios.....69



## Listado de Abreviaciones

<b>BAU</b>	Business as Usual – Bajo condiciones de mercado
<b>BB</b>	Battery Breakthrough – Penetración de baterías (mayoritariamente)
<b>BEV</b>	Battery Electric Vehicle, es decir, vehículo eléctrico a baterías
<b>CO</b>	Monóxido de carbono
<b>CO<sub>2eq</sub></b>	Dióxido de Carbono Equivalente
<b>COV</b>	Compuestos orgánicos volátiles
<b>CTP</b>	Costo Total de Posesión, conocido como TCO en inglés
<b>e</b>	“eléctrico” subíndice
<b>FCEV</b>	Fuel Cell Electric Vehicle- Vehículo eléctrico a celda de combustible
<b>FE</b>	Factor de emisión
<b>GEI</b>	Gas de Efecto Invernadero
<b>HB</b>	<b>Hydrogen Breakthrough – Penetración de FCEV (mayoritariamente)</b>
<b>HDV</b>	Heavy-duty Vehicle, es decir, vehículo pesado de carga
<b>ICEV</b>	Internal Combustion Engine, es decir, motor de combustión interna
<b>ICE</b>	Instituto Costarricense de Electricidad
<b>kW</b>	Kilovatio
<b>kWh</b>	Kilovatio-hora
<b>km-ton</b>	Kilómetro-tonelada métrica
<b>LCA</b>	Life-Cycle Assessment, es decir, análisis de ciclo de vida
<b>LCOE</b>	Levelized Cost of Electricity – Costo nivelado de electricidad
<b>LCOH</b>	Levelized Cost of Hydrogen – Costo nivelado de hidrógeno
<b>LDV</b>	Light-Duty Vehicle, es decir, vehículo ligero de carga
<b>MJ</b>	Mega Joule
<b>NOx</b>	Óxidos de nitrógeno
<b>PM 2.5,10</b>	Material particulado de 2.5 o 10 micras
<b>SOx</b>	Óxidos de azufre
<b>VEs</b>	Vehículos eléctricos

## Resumen Ejecutivo

El presente reporte tiene como objetivo ser una base de información útil sobre el Costo Total de Posesión (CTP) de los vehículos eléctricos a baterías, de celda de combustible y de sus equivalentes de combustibles fósiles en Costa Rica, en la actualidad y hasta 2050.

Se consideran tres tipos de trenes motrices: los de combustión interna (ICEV), eléctricos a batería (BEV) y eléctricos de celda de combustible (FCEV). Estos trenes motrices se analizan en cada uno de los segmentos estudiados: camiones de carga pesada, buses, vehículos de carga ligera, minibuses, y vehículos ligeros en uso particular y comercial (taxi o Uber).

El CTP es un indicador financiero que incluye el costo de adquisición y de operación de un activo durante su tiempo de vida útil.

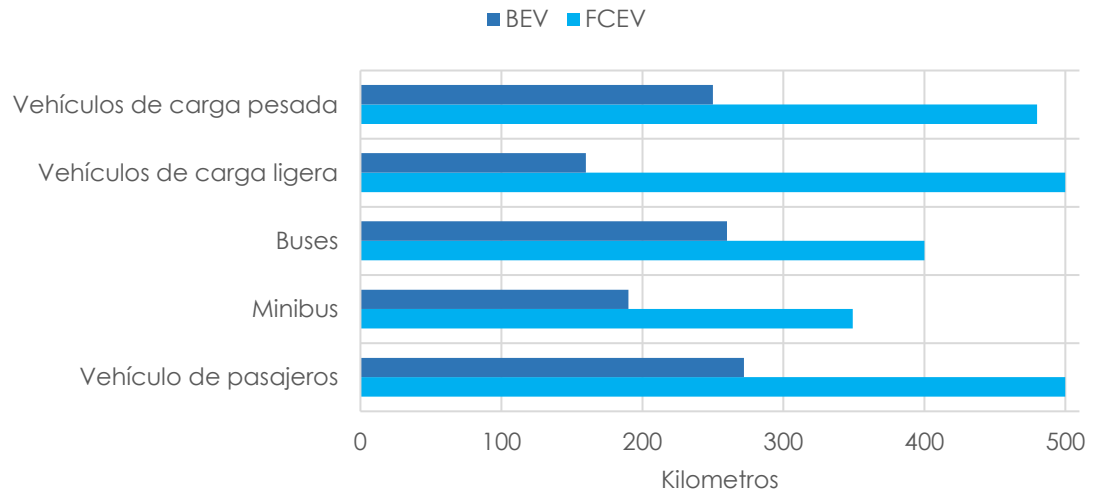
Para el caso de vehículos y medios de transporte en general, el CTP permite ver la proporción del gasto asociado a la compra de las unidades comparado con gastos operativos como el mantenimiento, combustibles, pólizas de seguros, etc.

El CTP, al ser una suma de costos, está expresado en dólares, sin embargo, con el objetivo de realizar comparaciones objetivas entre vehículos con el mismo tipo de recorridos y para entender cómo se ve afectado el costo de las unidades según su nivel de aprovechamiento, el CTP se ha parametrizado en función algunas variables tales como la distancia recorrida, la carga transportada o el número de pasajeros transportados. Por lo anterior, se han tenido en cuenta algunas consideraciones de autonomía, disponibilidad operativa y capacidad de pasajeros y carga útil como las que se muestran a continuación:

**Autonomía:** Los sistemas de hidrógeno almacenan mayor cantidad de energía por unidad de masa, lo que les permite satisfacer demandas energéticas de los sistemas más intensivos y pesados (camiones de carga, barcos, camiones de minería, etc.). En segmentos de recorridos generalmente cortos, como suelen ser lo de los vehículos ligeros particulares, una autonomía alta no es imperativa, sin embargo, para segmentos como el transporte de carga pesada o como los buses inter-urbanos (o incluso internacionales) existen múltiples rutas en Costa Rica que no podrían ser cubiertas por vehículos BEV, debido a que la autonomía no sería suficiente, por ejemplo:

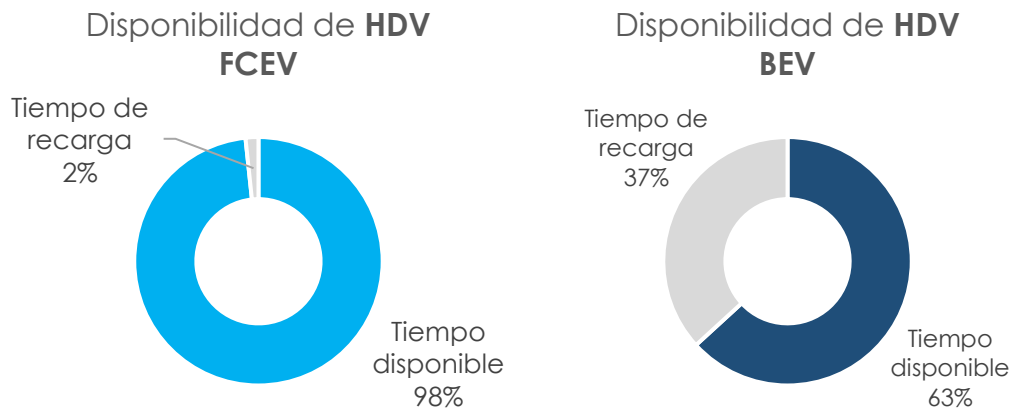
- San José – Peñas Blancas (290 km)
- San José – Paso Canoas (360 km)
- Limón – Liberia (350 km)
- Rutas internacionales hacia Panamá o Nicaragua
- Rutas de más de más de 100 km podrían ser cubiertas en viajes de ida pero no ida y vuelta.

### Autonomía de BEV & FCEV

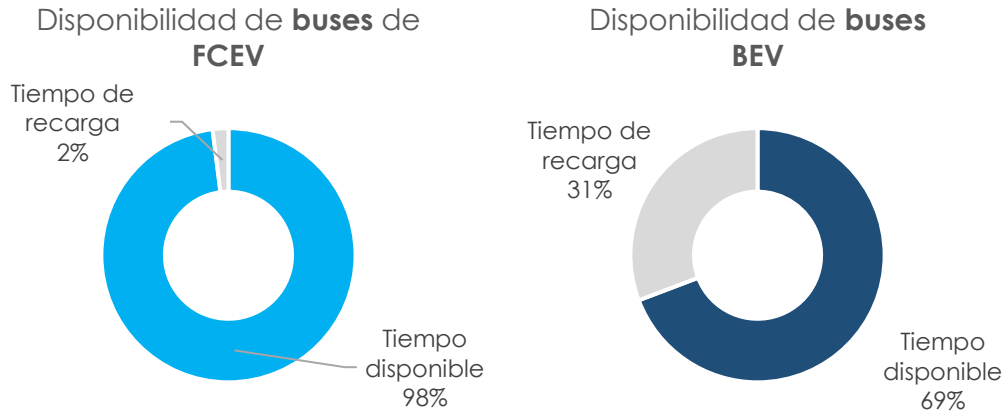


#### Autonomías de BEV y FCEV para diferentes categorías de vehículos<sup>1</sup>

**Disponibilidad operativa:** Los vehículos de carga pesada a celda de combustible pueden operar 23 horas diarias, mientras que para los de batería serían necesarias 8 horas (en 3 o 4 momentos del día) de recarga usando un cargador de 100 kW de potencia, lo que solo le permitiría estar operativo 16 horas por día. Los buses de baterías tendrían que realizar paradas cada 3.5 o 4 horas para recargar sus baterías, lo que imposibilita su uso para rutas de larga distancia.



<sup>1</sup> Comparativa realizada con información de las fichas técnicas de distintos fabricantes de vehículos BEV y FCEV



Comparación entre disponibilidades de HDV y buses BEV y FCEV

**Capacidad de transporte de pasajeros:** Un bus urbano de 12 metros a batería puede cargar máximo 70 pasajeros<sup>2</sup>, mientras que ese mismo bus a diésel o a celda de combustible puede llevar 79. La diferencia se debe al peso y el espacio necesario para colocar las baterías a bordo del bus BEV. Para algunas rutas de aforo bajo o medio, este no es un factor limitante. Sin embargo, en rutas muy transitadas, esta diferencia podría implicar la necesidad de adquirir un mayor número de unidades para satisfacer la demanda de movilidad.



■ Capacidad sacrificada de transporte de pasajeros por transporte del sistema energético

Comparación entre la capacidad de transporte de pasajeros en buses BEV y FCEV

<sup>2</sup> Incluye pasajeros sentados y de pie

**Capacidad de transporte de carga:** Un camión de carga pesada a baterías tendría que sacrificar el 33% de su carga útil para compensar el espacio y peso de las baterías que lleva a bordo. En el mismo camión a celda de combustible, la capacidad de carga a sacrificar es de solo el 8% frente a un camión convencional a diésel, que por regulación, puede cargar hasta 23 toneladas en Costa Rica. La capacidad máxima de carga útil es un factor crítico en el negocio del transporte de mercancías, por lo que debe ser considerado al momento de la toma de decisión de compra de este tipo de unidades.



#### Comparación entre la capacidad de carga en HDV de BEV y FCEV

Este informe recoge los resultados del análisis de CTP para una combinación específica de marcas y modelos seleccionados para cada segmento. Por esta razón, no se deben asumir los mismos resultados para otras combinaciones de modelos de vehículo. Las incertidumbres que se presentarían al generalizar las conclusiones para cualquier vehículo en un mismo segmento no han sido tomadas en cuenta en el alcance de este estudio.

Los principales resultados del análisis de CTP mostrados en la [sección 1.5.](#), se resumen a continuación:

El segmento de **carga pesada** se prevé que esté fuertemente dominado por la tecnología de celda de combustible (FCEV) en los años a venir. Esto se debe principalmente a que:

- Generalmente este tipo de vehículos recorren largas distancias (más de 300km/día), por lo que las autonomías de los vehículos a batería no serían suficientes.
- Existe una gran incertidumbre frente a la disponibilidad comercial de camiones BEV en el corto-mediano plazo ([ver sección 1.3.](#)).
- La carga total efectiva a transportar en los camiones de carga a baterías disminuiría considerablemente (-33%) frente a la de un camión convencional a diésel ([ver sección 1.3.](#)).

Para los **buses**, se espera que exista una combinación entre tecnologías de batería y de celdas de combustible, que estará determinada principalmente las distancias a recorrer, así:

- *Trayectos largos (>250km/día) y operación intensiva: Se espera que dominen los buses FCEV. Aproximadamente el 30% de los buses en Costa Rica son interurbanos. Varias de esas rutas, así como los buses urbanos de uso intensivo, no se podrían cubrir con BEV debido a una autonomía insuficiente ([ver sección 1.3.](#)).*
- *Trayectos cortos (<250km/día) y operación no intensiva: Se espera que dominen los buses a baterías (BEV) debido a su mayor competitividad económica.*

La **carga ligera** (< 4 ton) en Costa Rica se espera que tenga una combinación entre tecnologías de batería y de celdas de combustible, las cuales presentarían CTPs muy similares entre ellos de aquí a 2050. La decisión de compra estará determinada principalmente por los tamaños de flota y sus intensidades de uso, así:

- *Flotas de hasta ≈20 camiones: los FCEV serían más competitivos*
- *Flotas de más de ≈ 20 camiones, en recorridos cortos (<160 km/día) y operación baja en intensidad: los BEV obtendrían acceso a tarifas de media tensión por lo que podrían resultar más competitivos*

Los **minibuses** y **segmentos ligeros** (automóviles particulares y de uso como taxi y Uber) en Costa Rica se prevé que esté fuertemente dominados por la tecnología de baterías (BEV) en los años venir. Esto se debe principalmente a dos factores:

- *Los precios de adquisición de los FCEV son significativamente más altos que los BEV en estos segmentos*
- *Se prevé un costo de energético también mayor, ya que, para llevar un tanque más pequeño a bordo, estos vehículos cargan hidrógeno a alta presión (700 bar), el cual es más costoso que el hidrógeno a 350 bar que usan los vehículos pesados.*

La penetración de mini buses FCEV, si existiera oferta comercial disponible en el corto-mediano plazo, se podría dar para aplicaciones de uso intensivo, como shuttles turísticos, movilidad en aeropuertos, etc. Igualmente, en el segmento de ligeros (automóviles), los vehículos a celda de combustible podrían tener cabida en nichos tales como aplicaciones de uso intensivo y que requieran cortos tiempos de recarga de combustible, por ejemplo: taxis 24/7, vehículos patrulla, etc.

En la [sección 2](#) se analizaron tres posibles escenarios de despliegue de movilidad eléctrica en Costa Rica de 2020 a 2050. Los tres escenarios asumen que se cumple con las metas del Plan de Descarbonización de Costa Rica (Presidencia\_CR, 2019). La variación entre escenarios se da por la proporción entre BEV y FCEV, así:

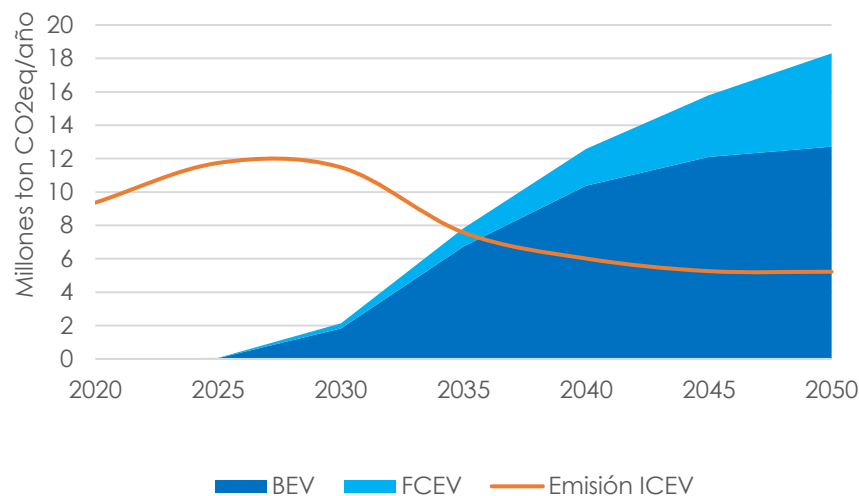
- **Escenario Business as Usual:** asume la continuidad de las tendencias actuales del mercado de la movilidad eléctrica a nivel global.
- **Escenario Hydrogen Breakthrough:** asume un despliegue donde los FCEV predominarían sobre los BEV debido a una más rápida caída en precios de estos vehículos y sus componentes, así como favorabilidad en las condiciones de producción de hidrógeno.
- **Escenario Battery Breakthrough:** asume un despliegue donde los BEV predominarían sobre los FCEV debido a una más rápida caída en precios de estos vehículos y sus componentes.

En la [sección 3](#) se han calculado los cobeneficios de implementar la movilidad eléctrica en Costa Rica, asumiendo que se alcanza la penetración de vehículos proyectada en el escenario Business as Usual.

El principal beneficio será el ahorro en emisiones de gases de efecto invernadero y de contaminantes locales.

Al año 2050 Costa Rica alcanzaría una reducción total de 18.3 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>eq y emisiones por ICEV de 5.2 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>eq. Así, el ahorro en emisiones en 2050 es 3.5 veces lo que se proyecta que emitan los vehículos convencionales.

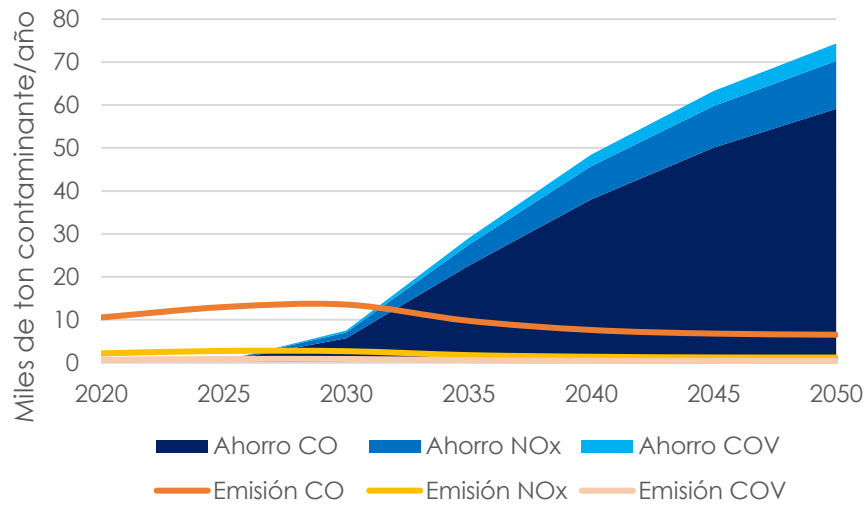
Ahorro en emisión de GEI



### Ahorro en emisiones de GEI sector transporte. Escenario BAU

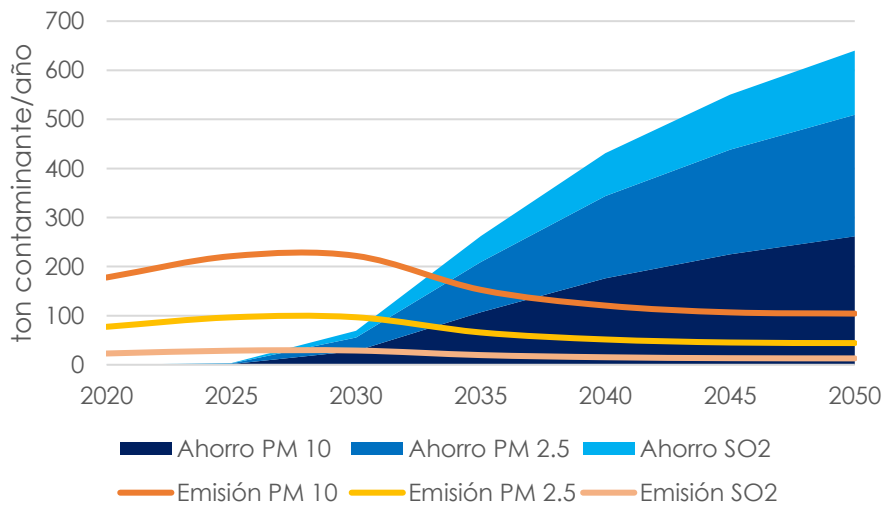
El ahorro de contaminantes es igual o mayor al total de las emisiones de los vehículos convencionales desde el año 2031. En el caso de las emisiones de material particulado, se alcanza un ahorro equivalente al 100% de lo que emiten los ICEV desde alrededor del año 2037.

### Ahorro y Emisión de Contaminantes



### Ahorro en emisiones de contaminantes sector transporte (CO, NOx,COV)

### Ahorro y Emisión de Contaminantes



### Ahorro en emisiones de contaminantes sector transporte (PM10, PM2.5, SO2)

Se han analizado igualmente los ahorros económicos en combustibles importados, así como la creación de empleos y otros beneficios en la [sección 3](#).



## Alcance y objetivos del informe

El presente reporte tiene como objetivo ser una base de información útil sobre el Costo Total de Posesión (CTP) de los vehículos eléctricos a baterías, de celda de combustible y de sus equivalentes de combustibles fósiles en Costa Rica, en la actualidad y hasta 2050, en varios segmentos de transporte ([sección 1](#)).

Se consideran tres tipos de trenes motrices: los de combustión interna (ICEV), eléctricos a batería (BEV) y eléctricos de celda de combustible (FCEV). Estos trenes motrices se analizan en cada uno de los segmentos estudiados: camiones de carga pesada, buses, vehículos de carga ligera, minibuses, y vehículos ligeros en uso particular y comercial (taxi o Uber).

Con la información obtenida del CTP, y teniendo también en cuenta la viabilidad técnica para prestar servicio en ciertos nichos, se identifican los segmentos de movilidad en que los vehículos eléctricos a baterías o de celda de combustible podrían ser más competitivos y se generan posibles escenarios de penetración de ambos tipos de vehículo en Costa Rica para el periodo 2020 - 2050 ([sección 2](#)).

Se presenta también un análisis de cobeneficios de la adopción de vehículos eléctricos en Costa Rica bajo el escenario de penetración Business as Usual. Este análisis permite adquirir conciencia sobre los impactos positivos de la electrificación del transporte, tales como la reducción de emisiones, la disminución de la dependencia de combustibles fósiles, generación de empleo, entre otros ([sección 3](#)).

Finalmente, con el objetivo de incrementar la adopción de tecnologías de movilidad más limpias en Costa Rica, se plantea el concepto de "costo de abatimiento", un cálculo derivado del Costo Total de Posesión que valoriza económicamente el costo por tonelada de CO<sub>2</sub> que deja de emitirse cuando se adopta una tecnología más limpia ([Anexo 4](#)).

## 1. Costo Total de Posesión (CTP)

### 1.1. Definición del Costo Total de Posesión

El Costo Total de Posesión (CTP, conocido en inglés como *Total Cost of Ownership – TCO*) es un indicador financiero que incluye el costo de adquisición y de operación de un activo durante su tiempo de vida útil. El Costo Total de Posesión se puede obtener de forma retrospectiva, pero que es de mayor utilidad cuando se obtiene de manera predictiva, ya que ayuda a los tomadores de decisiones a entender cómo impactarán los gastos variables en el gasto total que se deberá hacer al adquirir o renovar un activo.

Cuando el CTP es calculado de forma predictiva (figura 1-2), incluye consideraciones y proyecciones del costo de algunos insumos, por ejemplo, costo de combustibles, costos de mantenimientos, impuestos, etcétera. Los supuestos utilizados para los resultados presentados en este informe se describen en detalle en la [sección 1.4](#).

Para el caso de vehículos y medios de transporte en general, el Costo Total de Posesión permite ver la proporción del gasto asociado a la compra de las unidades comparado con gastos operativos como el mantenimiento, combustibles, pólizas de seguros, etc. Se define la ecuación del CTP para vehículos como:

$$CTP = \text{Costo de adquisición} + \sum \text{Costos Administrativos} + \text{Costo de mantenimiento} + \text{Costo total del energético}$$

Donde:

- Costo de adquisición = Precio del vehículo antes de impuestos.
- $\sum$ Costos administrativos = Impuestos a la fabricación o importación + Impuestos a la compra + Impuestos a la tenencia vehicular + Costos de financiamiento
- Costo de mantenimiento = Costo total de mantenimiento al vehículo durante su vida útil
- Costo total del energético = Costo total del combustible consumido por el vehículo durante su vida útil

### 1.2. Componentes del CTP

A continuación se presentan las componentes de costos que se han tenido en cuenta en el cálculo del CTP para todas las categorías de vehículos son:

- a) Costo de adquisición
  - Precio comercial del vehículo
  - Costo por cambio de baterías (BEV) o stack de celda de combustible (FCEV)
- b) Costos administrativos
  - Impuesto al Valor Agregado

- Impuesto Selectivo de Consumo
  - Impuesto a la importación (no aplica a todos los vehículos)
  - Impuesto a la tenencia vehicular
  - Costo de financiamiento
  - Póliza de seguro obligatorio
- c) Costos de mantenimiento
- d) Costo total del energético
- Costo del consumo total de energético (gasolina, diésel, energía eléctrica o hidrógeno) de acuerdo a los recorridos promedio esperados.

Los supuestos utilizados para los cálculos en cada una de estas categorías de costos, se encuentran descritos en la [sección 1.4.](#)

Como resultado de la suma de costos, el CTP puede presentarse de manera puntual para un año dado o proyectado en un periodo de tiempo.

La figura 1-1 muestra un ejemplo de cómo luce el CTP de los vehículos ligeros de uso comercial en 2020. Este tipo de gráficos permiten identificar los componentes que más contribuyen al costo total, y, como consecuencia, actuar o tomar medidas que ayuden a reducir estos costos. En el [Anexo 1](#) se muestra una colección de gráficos puntuales de CTP para cada segmento de vehículos en los años 2020, 2030 y 2050.

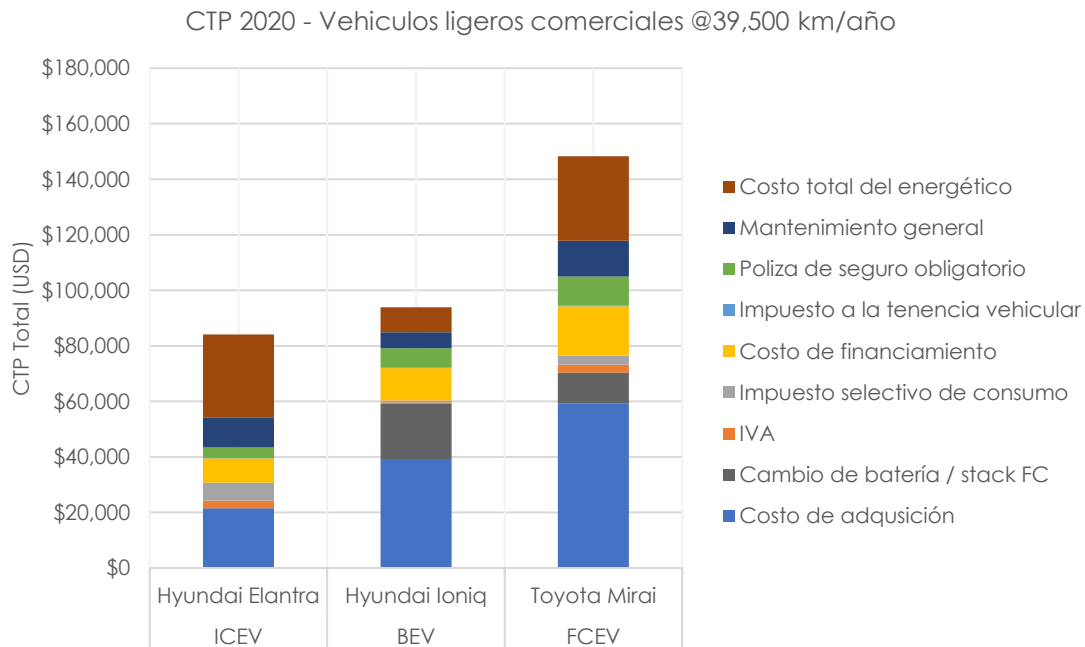


Figura 1-1 CTP 2020 de vehículos ligeros comerciales

La figura 1-2 muestra un ejemplo de cómo se ha presentado la evolución de CTP en el periodo analizado (2020-2050). Este tipo de gráficos permiten identificar los momentos donde se alcanza paridad de costos entre las diferentes tecnologías.

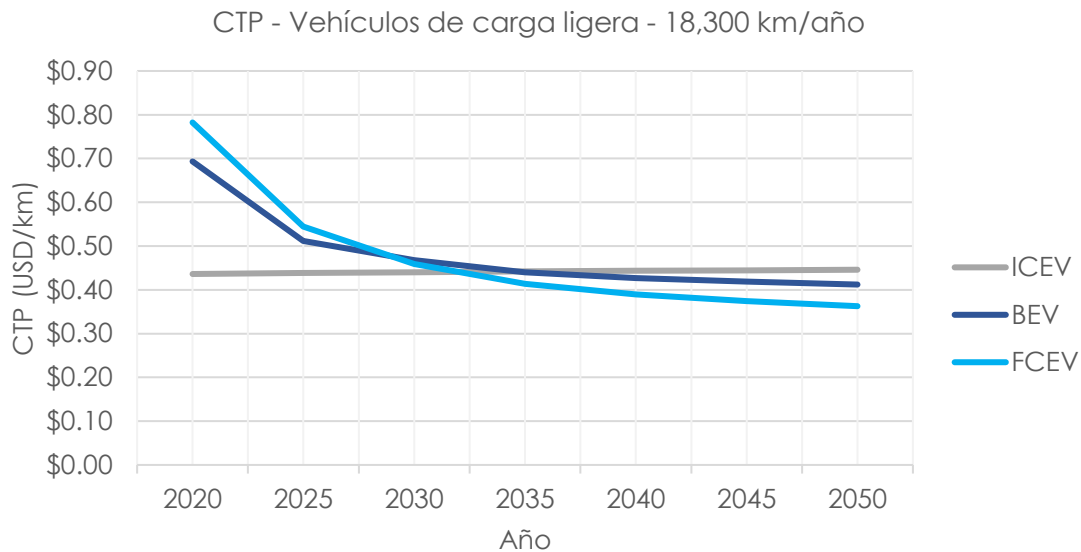


Figura 1-2 Proyección de CTP de vehículos de carga ligera

### 1.3. Consideraciones iniciales sobre los vehículos eléctricos

Esta sección describe algunas consideraciones generales que se han tenido en cuenta para parametrizar los resultados de CTP.

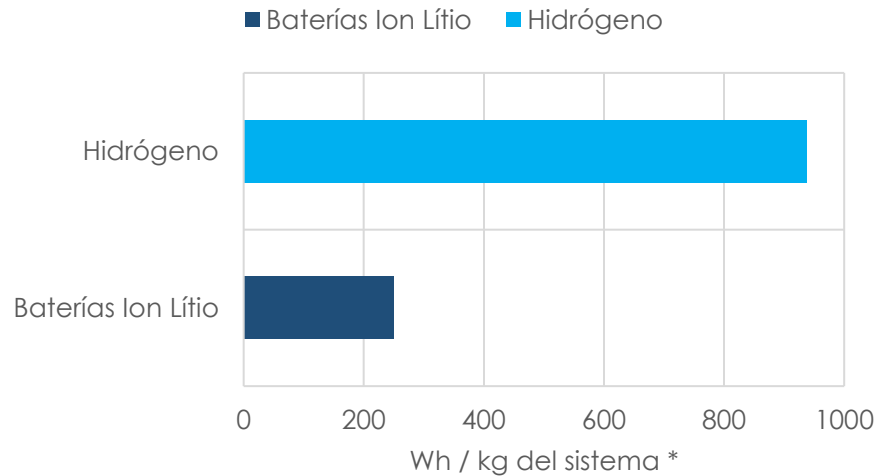
El CTP, al ser una suma de costos, está expresado en dólares, sin embargo, es posible parametrizarlo en función de alguna variable importante analizada, por ejemplo: la distancia recorrida de un vehículo, para obtener así valores expresados en dólares por kilómetro. También se puede parametrizar en función la distancia recorrida y la carga transportada para obtener dólares por kilómetro por tonelada. Esto resulta de utilidad para hacer comparaciones objetivas entre vehículos con el mismo tipo de recorridos y para entender cómo se ve afectado el costo de un activo según su nivel de aprovechamiento. En las [sección 1.5](#) se encuentran los resultados parametrizados de esta manera.

#### Autonomía

Existen diferencias en las autonomías<sup>3</sup> y capacidad de transporte de pasajeros o de carga entre los ICEV, los BEV y los FCEV. Lo anterior se debe a las diferencias en

<sup>3</sup> La autonomía de un vehículo eléctrico se define como la distancia que puede recorrer con una sola carga de batería o con un solo tanque lleno de hidrógeno

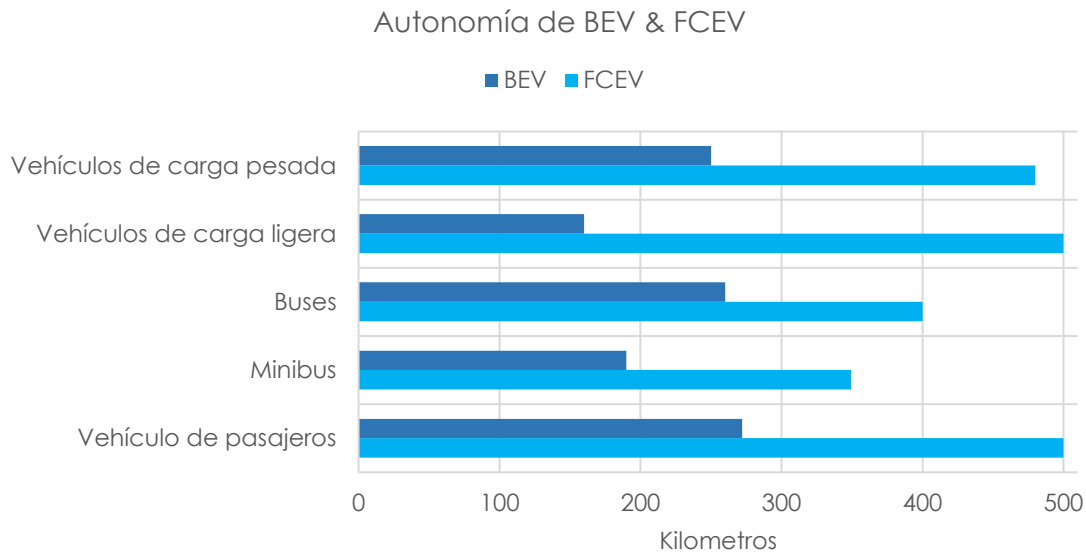
densidad energética de los sistemas de almacenamiento de energía dentro de los vehículos, tal como muestra la figura 1-3 (proporción guardada entre la densidad energética de las baterías de litio a plena carga y los sistemas de almacenamiento de hidrógeno en tanques presurizados cargados).



*Figura 1-3 Densidad energética de las baterías de litio y de los sistemas de hidrógeno comprimido*

Los sistemas de hidrógeno almacenan mayor cantidad de energía por unidad de masa, lo que les permite satisfacer demandas energéticas de sistemas más intensivos y pesados (camiones de carga, barcos, camiones de minería, etc.)

Como se aprecia en la figura 1-3, los tanques de hidrógeno presurizado pueden almacenar más energía por kilogramo de sistema, por lo que brindan autonomías más altas. La figura 1-4 muestra la diferencia de autonomías promedio entre los BEV y FCEV estudiados en este reporte.



*Figura 1-4 Autonomías de BEV y FCEV para diferentes categorías de vehículos<sup>4</sup>*

En segmentos de recorridos generalmente cortos, como suelen ser lo de los vehículos ligeros particulares, una autonomía alta no es imperativa, sin embargo para segmentos como el transporte de carga pesada o como los buses inter-urbanos (o incluso internacionales) existen múltiples rutas que no podrían ser cubiertas por vehículos BEV en Costa Rica, ya que la autonomía no sería suficiente, por ejemplo:

- San José – Peñas Blancas (290 km)
- San José – Paso Canoas (360 km)
- Limón – Liberia (350 km)
- Rutas internacionales hacia Panamá o Nicaragua
- Rutas de más de más de 100 km podrían ser cubiertas en viajes de ida pero no ida y vuelta.

### Disponibilidad de los vehículos

La naturaleza de abastecimiento de los energéticos influye en la disponibilidad de los vehículos para operar.

Por ejemplo, la experiencia de abastecimiento de hidrógeno en un FCEV es muy similar a la que tradicionalmente conocemos con los vehículos de combustión interna (ICEV): el vehículo carga en una estación por periodos de pocos minutos. Sin embargo, la experiencia de recarga es diferente para los vehículos a baterías, requiriendo de varias

<sup>4</sup> Comparativa realizada con información de las fichas técnicas de distintos fabricantes de vehículos BEV y FCEV

horas (dependiendo del tipo de cargador) para recarga en estaciones públicas, domicilios o lugares de trabajo.

Al igual que la autonomía, la disponibilidad del vehículo para operar tiene un impacto mayor en los segmentos de uso intensivo, por ejemplo en los buses y vehículos de carga ligera y pesada.

Consideremos el ejemplo de un vehículo de carga pesada (HDV, por sus siglas en inglés) que debe aprovecharse la mayor cantidad de horas al día y que circula a una velocidad promedio de 60 km/h. Para el caso del vehículo BEV, serían necesarias 8 horas (en 3 o 4 momentos del día) de recarga usando un cargador de 100 kW de potencia, lo que solo le permitiría estar operativo 16 horas por día. El mismo camión HDV, impulsado por celdas de combustible, necesitaría recargar combustible en dos ocasiones, lo que tomaría como máximo 30 minutos, por lo que estaría disponible 23 horas al día. Lo mismo ocurre si pensamos en un bus inter urbano o en uno de rutas internacionales (Nicaragua o Panamá), su disponibilidad máxima de uso sería de unas 16 horas y 40 minutos al día, teniendo que hacer paradas cada 3.5 o 4 horas para recargar sus baterías.

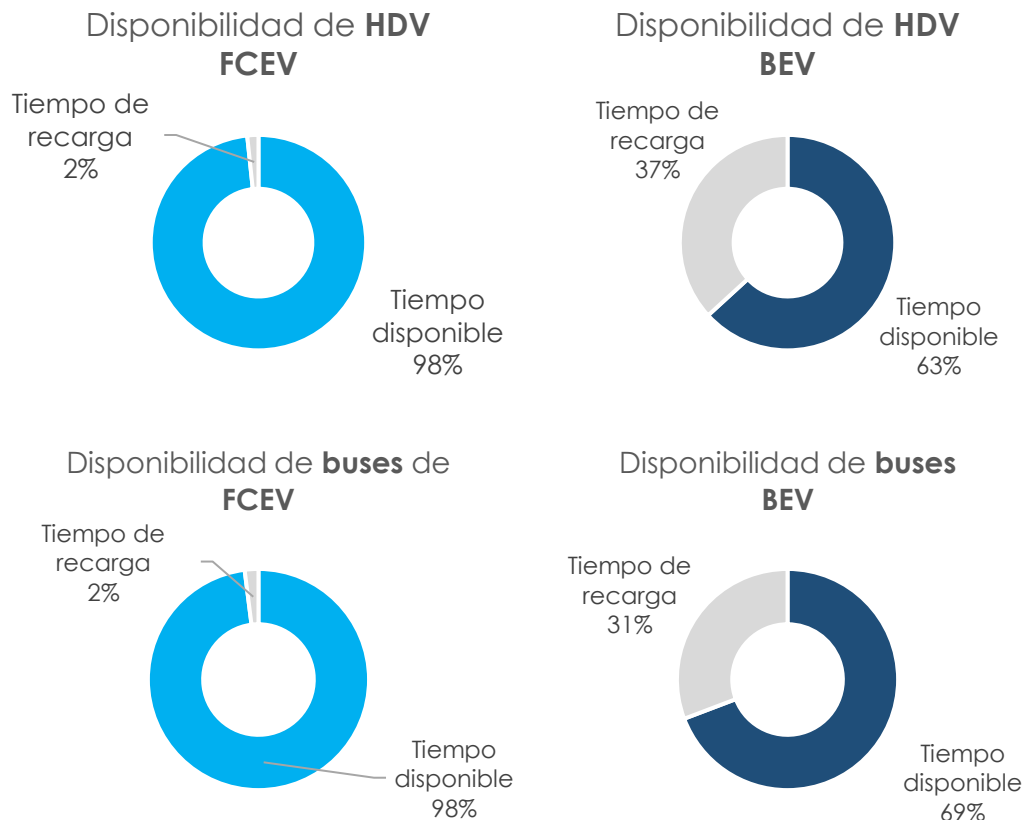


Figura 1-5 Comparación entre disponibilidades de HDV y buses BEV y FCEV

### Capacidad de transporte de pasajeros

La capacidad de transporte de pasajeros también se ve afectada según el tipo de tren motriz. Por efecto del peso y del espacio necesario para colocar las baterías, los buses BEV ven disminuida su capacidad de transporte de pasajeros frente a un bus ICEV o un bus FCEV.

Para un bus urbano de 12 metros, como los que se estudiaron en este trabajo, la capacidad de transporte de un BEV es de 70 pasajeros<sup>5</sup>, mientras que para un ICEV y un FCEV es de 79.

Para algunas rutas de aforo bajo o medio, este no es un factor limitante. Sin embargo, en rutas muy transitadas, esta diferencia podría implicar la necesidad de adquirir un mayor número de unidades para satisfacer la demanda de movilidad.



Figura 1-6 Comparación entre la capacidad de transporte de pasajeros en buses BEV y FCEV

### Capacidad de transporte de carga

Por motivos de seguridad en los caminos y de cuidado a la infraestructura carretera, el Reglamento sobre Vehículos de Carga de Costa Rica establece límites de carga a diferentes tamaños de vehículos. Un HDV convencional, de dos sistemas de ejes en el cabezal y un sistema de ejes en la caja puede cargar 23 toneladas.

Un camión BEV tendrá que cargar 7.6 toneladas de baterías, lo que significa sacrificar el 33% de su carga útil. En contraste, el camión FCEV lleva consigo 1.9 toneladas de celda de combustible, tanques de almacenamiento de hidrógeno, e hidrógeno, pero sacrificaría solo el 8% del peso frente a un camión diésel.

La capacidad máxima de carga útil es un factor crítico en el negocio del transporte de mercancías, por lo que debe ser considerado al momento de la toma de decisión de compra de este tipo de unidades.

<sup>5</sup> Incluye pasajeros sentados y de pie





Figura 1-7 Comparación entre la capacidad de carga en HDV de BEV y FCEV

Debido a esta característica de los FCEV, la oferta tecnológica de camiones de carga pesada cero emisiones de alto tonelaje (> 18 Ton) se está enfocando en FCEV. A 2020 ya circulan en recorridos comerciales de prueba algunos modelos de las marcas Nikola, Kenworth y Toyota. Así mismo, varios otros vehículos de alta demanda energética están siendo diseñados, construidos y probados con celdas de combustible, tales como los montacargas, los vehículos de carga y tractores en minería, vehículos de arrastre de aviones, etc.

Al día de hoy, los camiones BEV para estos grandes tonelajes aún se encuentran en desarrollos conceptuales o prototipos en construcción, por lo que existe cierta incertidumbre sobre su oferta comercial futura.

#### 1.4. Supuestos de cálculo

##### Costo de adquisición

##### Camiones de carga pesada (HDV)

La Tabla 1-1 muestra los modelos seleccionados para esta modalidad de transporte y sus costos de adquisición actuales, para el vehículo ICEV, y pronosticados por los fabricantes para los casos eléctricos.

Tabla 1-1 Vehículos de carga pesada estudiados y costo de adquisición

	HDV ICEV <sup>[13]</sup>	HDV BEV <sup>[14]</sup>	HDV FCEV <sup>[15]</sup>
Modelo	Kenworth W990	Xos ET-One	Kenworth T680s
Potencia motriz (kW)	302	230	228
Autonomía reportada (km)	2683	483	483
Precio de venta al público (USD)	\$150,000	\$200,000	\$375,000
Combustible	Diésel	Electricidad	Hidrógeno

[13] Keenworth Sales Co (2020), 2020 Kenworth W990. Recuperado de: <https://www.kenworthsalesco.com>

[14] Xos Trucks (2020) ET-One. Recuperado de: <https://xostrucks.com/et-one/>

[15] Comercial Motor (2019) A closer look at hydrogen fueled trucks. Recuperado de: <https://www.commercialmotor.com>

##### Buses

Uno de los sectores donde existe la mayor oferta de vehículos de todas las tecnologías energéticas es el de los buses. Este estudio analiza tres buses urbanos de 12 m de

longitud, los cuales están disponibles en más de una tecnología energética en todos los casos.

En la Tabla 1-2 se muestra el resumen de los buses estudiados, algunas de sus prestaciones y los costos de adquisición para cada uno.

*Tabla 1-2 Buses estudiados y costo de adquisición*

	Bus ICEV <sup>[7]</sup>	Bus BEV <sup>[8]</sup>	Bus FCEV <sup>[9]</sup>
Modelo	Solaris Urbino 12 Conv.	Solaris Urbino 12	Van Hool A330
Potencia motriz (kW)	209	250	85
Autonomía reportada (km)	600	350	402
Precio de venta al público (USD)	\$220,000	\$320,000	\$530,000
Combustible	Diésel	Electricidad	Hidrógeno

[7] Solaris (2019), Conventional Powertrain Catalogue 2019/2020

[8] Sustainable Bus (2019), Solaris Urbino 12 Electric. Recuperado de: <https://www.sustainable-bus.com/news/three-solaris-urbino-12-electric-in-wloclawek-poland/>

[9] Ballard (2015) A330 Fuel Cell Buses - VanHool

### Vehículos de carga ligera (LDV)

Los vehículos de carga ligera son comúnmente identificados por ser los que utilizan las empresas transportistas para entregas de última milla dentro de las ciudades. Son camionetas tipo van o camiones pequeños con capacidad de carga entre 3 y 4 toneladas. Su oferta de modelos de tecnologías eléctricas está en desarrollo. Para el caso de los FCEV, aún no existe un modelo comercial, solo desarrollos de pequeñas flotas en asociación entre empresas paqueteras y empresas fabricantes de vehículos, por lo que su costo de adquisición no es información pública. Para obtener el costo de adquisición de los LDV - FCEV se usó un modelado que toma como referencia la proporción en costos del vehículo de pasajeros y del de carga ligera ICEV y se asumió la misma proporción entre los modelos FCEV. Los resultados se observan en la Tabla 1-3.

*Tabla 1-3 Vehículos de carga ligera estudiados y costo de adquisición*

	LDV ICEV <sup>[10]</sup>	LDV BEV <sup>[11]</sup>	LDV FCEV <sup>[12]</sup>
Modelo	Renault Kangoo Maxi	Streetscooter WORK L	H2 Panel Van
Potencia motriz (kW)	81	68	114
Autonomía reportada (km)	1130	100	500
Precio de venta al público (USD)	\$19,000	\$51,960	\$54,000
Combustible	Diésel	Electricidad	Hidrógeno

[10] Renault (2020) Kangoo Specifications. Recuperado de: <https://www.renault.com.au/vehicles/commercial/kangoo/kangoo/features-specifications>

[11] StreetScooter (2020) Technische Daten WORK L. Recuperado de: <https://www.streetscooter.com/de/modelle/work-l/#technische-daten>

[12] Hinicio (2020) con información de StreetScooter y DHL recuperada de: <https://fuelcellworks.com/news/dhl-and-streetscooter-develop-new-electric-drive-vehicle-with-hydrogen-technology/>

## Mini-buses

En esta categoría existen vehículos disponibles a combustión interna y eléctrico a baterías, para los cuales se eligieron el Toyota Hiace y el Nissan e-NV200 EVALIA, respectivamente. Para el caso del vehículo de celda de combustible, al no existir un modelo comercial disponible, fue necesario hacer una extrapolación de características técnicas y económicas. El costo de adquisición se estimó considerando la proporción que guarda un vehículo de pasajeros de combustión interna con un mini bus también de combustión interna y se aplicó ese mismo factor al costo del vehículo de pasajeros FCEV para obtener el costo del mini bus.

La Tabla 1-4 muestra el resumen de los mini buses estudiados y sus costos de adquisición.

Tabla 1-4 Mini buses estudiados y costo de adquisición

	Mini bus ICEV <sup>[4]</sup>	Mini bus BEV <sup>[5]</sup>	Mini bus FCEV <sup>[6]</sup>
Modelo	Toyota Hiace	Nissan e-NV200 EVALIA	Mini bus H <sub>2</sub> (Genérico)
Potencia motriz (kW)	204	80	114
Autonomía reportada (km)	778	154	322
Precio de venta al público (USD)	\$24,600	\$45,000	\$77,090
Combustible	Gasolina	Electricidad	Hidrógeno

[4] Toyota (2020), Hiace Ventana Superlarga. Recuperado de: <https://www.toyota.mx/versiones/hiace/ventana-superlarga>

[5] Electric Vehicle Database (2020), Nissan e-NV200 Evalia. Recuperado de: <https://ev-database.org/car/1117/Nissan-e-NV200-Evalia>

[6] Inicio con información de [Pütz et al. 2018], [Thor 2018]

## Vehículos particulares

Se eligieron para este estudio vehículos de pasajeros que tuvieran prestaciones y desempeños similares en los tres casos de tren motriz. Se tomó en cuenta también la presencia de estos vehículos en el mercado costarricense en el año 2020, o la cercanía en tiempo en que podría ser introducido el modelo al país, para el caso del vehículo de celda de combustible (tabla 1-5).

Tabla 1-5 Vehículos de pasajeros estudiados y costo de adquisición

	Vehículo ICEV <sup>[1]</sup>	Vehículo BEV <sup>[2]</sup>	Vehículo FCEV <sup>[3]</sup>
Modelo	Hyundai Elantra	Hyundai Ioniq	Toyota Mirai
Potencia motriz (kW)	109.6	100	113
Autonomía reportada (km)	649.6	350	502
Precio de venta al público (USD)	\$21,500	\$38,900	\$59,300

Combustible	Gasolina	Electricidad	Hidrógeno
-------------	----------	--------------	-----------

[1] DOE (2020), 2020 Hyundai Elantra – Fuel Economy. Recuperado de: <https://www.fueleconomy.gov/feg/Find.do?action=sbs&id=41406>

[2] DOE (2020), 2020 Hyundai Ioniq Electric– Fuel Economy. Recuperado de <https://www.fueleconomy.gov/feg/Find.do?action=sbs&id=42273>

[3] James, Brian D. V.E.5 Fuel Cell Vehicle Cost Analysis. Diciembre 2017

### Decrecimiento del CAPEX de BEV y FCEV

Los precios de vehículos eléctricos tanto de baterías como de celda de combustible tienen una tendencia a la baja. Debido a la madurez tecnológica y a la ya avanzada curva de decremento en precios de los BEV, se prevé que los FCEV tengan caídas más drásticas en sus precios a mediano plazo, y que rumbo a 2050 las diferencias entre BEV y FCEV sean menores. La tabla 1-6 muestra el decremento de CAPEX que se ha estimado para los vehículos eléctricos.

Tabla 1-6 Proyección del decremento en el CAPEX de vehículos eléctricos en Costa Rica<sup>[34]</sup>

FCEV						
Año	Vehículo ligero particular	Vehículo ligero comercial	Mini buses	Buses	LDV	HDV
2020	\$59,300	\$59,300	\$77,090	\$530,000	\$65,000	\$375,000
2025	\$43,113	\$43,113	\$50,812	\$370,488	\$43,223	\$280,395
2030	\$37,443	\$37,443	\$42,462	\$317,648	\$36,020	\$247,369
2035	\$34,479	\$34,479	\$38,229	\$290,304	\$32,377	\$229,883
2040	\$32,520	\$32,520	\$35,484	\$272,343	\$30,017	\$218,232
2045	\$31,077	\$31,077	\$33,491	\$259,181	\$28,306	\$209,603
2050	\$29,945	\$29,945	\$31,947	\$248,900	\$26,981	\$202,806
BEV						
Año	Vehículo ligero particular	Vehículo ligero comercial	Mini buses	Buses	LDV	HDV
2020	\$38,900	\$38,900	\$45,000	\$320,000	\$51,960	\$200,000
2025	\$31,270	\$31,270	\$37,001	\$300,800	\$36,754	\$184,000
2030	\$28,227	\$28,227	\$34,010	\$282,752	\$31,679	\$176,720
2035	\$26,585	\$26,585	\$32,374	\$274,269	\$29,041	\$171,418
2040	\$25,479	\$25,479	\$31,261	\$266,041	\$27,304	\$166,276
2045	\$24,653	\$24,653	\$30,424	\$263,381	\$26,028	\$164,613
2050	\$23,997	\$23,997	\$29,757	\$260,747	\$25,031	\$162,967

[34] Proyección de Hinicio con información de Bloomberg NEF y del FCH-JU

## Cambio de batería (BEV) o celda de combustible (FCEV)

En los vehículos eléctricos dos de los componentes más importantes en la gestión energética del vehículo (las baterías y las celdas de combustible) tienen tiempos de vida limitados y, dependiendo de la intensidad de uso, deben ser cambiados una o más veces durante la vida útil del vehículo.

Para este análisis se calculó, para cada vehículo, si el cambio de componente (batería o celda de combustible) sería necesario de acuerdo al kilometraje promedio de su categoría, y, en caso de ser necesario, se consideró el costo del componente de acuerdo con las proyecciones de precios para cada uno. La vida útil de ambos componentes se asume constante hasta 2050.

La tabla 1-7 muestra un resumen de los costos de baterías, de celdas de combustible y la vida útil en cada caso.

Tabla 1-7 Costo y vida útil de las baterías y celdas de combustible automotrices

	Batería Vehículos ligeros	Batería Vehículos pesados	Celda de combustible Vehículos ligeros	Celda de combustible Vehículos pesados
Vida útil	160,000 km <sup>[16]</sup>	6 años <sup>[17]</sup>	5,000 horas de uso <sup>[18]</sup>	20,000 horas de uso <sup>[18]</sup>
Costo del componente	% del costo del vehículo <sup>[19]</sup>	% del costo del vehículo <sup>[19]</sup>	% del costo del vehículo <sup>[20]</sup>	(USD/kW) <sup>[21]</sup>
2020	36%	36%	20%	\$ 200
2025	26%	26%	18.76%	\$ 190
2030	21%	21%	17.60%	\$ 176
2035	18%	18%	16.51%	\$ 165
2040	18%	18%	15.49%	\$154
2045	17%	17%	14.53%	\$145
2050	17%	17%	13.63%	\$ 136

[16] EDF Electric cars & batteries. Recuperado de: <https://www.edfenergy.com/electric-cars/batteries>

[17] Anassia Franca, 2015- Recuperado de:

[https://www.uvic.ca/research/centres/iesvic/assets/docs/dissertations/Dissertation\\_Franca.pdf](https://www.uvic.ca/research/centres/iesvic/assets/docs/dissertations/Dissertation_Franca.pdf)

[18] DOE, Fuel cells. Recuperado de: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f32/fcto\\_myrrdd\\_fuel\\_cells.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f32/fcto_myrrdd_fuel_cells.pdf)

[19] Bloomberg, 2019. Electric Car Price Tag Shrinks Along With Battery Cost

[20] Argonne Nat. Lab, 2017. Fuel Cell Powered Vehicles; an analysis of how technology progress affects the technical and economical feasibility.

[21] DOE, 2018. 2018 Cost Projections of PEM Fuel Cell Systems for Automobiles and Medium-Duty Vehicles

## Costos Administrativos (impuestos, pólizas, financiamiento)

### Aranceles a la Importación e Impuesto selectivo de consumo.

Se toman en cuenta los aranceles de importación de los vehículos en Costa Rica según datos del Ministerio de Hacienda de Costa Rica.

El Impuesto Selectivo de Consumo se aplica a la importación o fabricación nacional de las mercancías que se encuentran descritas en el Anexo de la el decreto No. 4961 de la Ley de Consolidación del Impuesto Selectivo de Consumo, en el cual los vehículos automotores están enlistados en los numerales 8702 a 8711.

El Reglamento de Incentivos para el Transporte Eléctrico de Costa Rica establece exoneraciones a este impuesto de acuerdo con el valor comercial del vehículo eléctrico, tal como se describe en la Tabla 1-8.

Tabla 1-8 Impuesto selectivo de consumo y aranceles a la importación para vehículos en Costa Rica

Tipo de vehículo <sup>[22]</sup>	Impuesto selectivo de consumo	Aranceles a la importación
Vehículo de pasajeros	30%	0%
Autobuses	23-43 %	5%
Taxis	30%	0%
Camiones	14-48%	14%
Vehículos eléctricos	Exonerado	0%
Exoneración al Impuesto Selectivo de consumo en vehículos eléctricos (BEV y FCEV) <sup>[23]</sup>	Primeros 30,000 USD	100% del impuesto
	30,000 a 45,000 USD	75% del impuesto
	45,000 a 60,000 USD	50% del impuesto
	Más de 60,000 USD	0%

[22] OCDE (2017) Análisis de políticas fiscales de la OCDE Costa Rica 2017.

[23] Reglamento de incentivos para el transporte eléctrico N° 41092-MINAE-H-MOPT

### Impuesto al Valor Agregado

El Impuesto al Valor Agregado (IVA) para los vehículos en Costa Rica, corresponde a un 13% del valor comercial del vehículo. De acuerdo con el Decreto Ejecutivo 41092,

existen exoneraciones a este impuesto cuando se trata de vehículos eléctricos<sup>6</sup>. Este beneficio se tasa de la siguiente forma:

- Primeros 30,000 USD: Exoneración del 100% del impuesto.
- Sobre el exceso de 30,000 y hasta 45,000 USD: Exoneración del 50% del impuesto.
- Sobre el exceso de 45,000: Exoneración del 0%.

### *Impuesto a la tenencia vehicular*

El impuesto a la tenencia vehicular se paga anualmente y se calcula de acuerdo al valor comercial presente de los vehículos, tal como muestra la Tabla 1-9.

*Tabla 1-9 Impuesto a la tenencia vehicular en Costa Rica<sup>[24]</sup>*

Valor	Tasa
Hasta ₡ 270.000,00	₡ 27.600,00
Sobre el exceso de ₡ 270.000,00 y hasta ₡ 1.050.000,00	1,2 %
Sobre el exceso de ₡ 1.050.000,00 y hasta ₡ 2.070.000,00	1,5 %
Sobre el exceso de ₡ 2.070.000,00 y hasta ₡ 3.130.000,00	2,0 %
Sobre el exceso de ₡ 3.130.000,00 y hasta ₡ 3.900.000,00	2,5 %
Sobre el exceso de ₡ 3.900.000,00 y hasta ₡ 4.680.000,00	3,0%
Sobre el exceso de ₡ 4.680.000,00	3,5 %

[24] Ministerio de Hacienda Costa Rica (2019) Tarifas impuesto a la propiedad de vehículos automotores, aeronaves y embarcaciones.

En el caso de los vehículos de transporte remunerado de personas o de mercancías (no incluidos los vehículos tipo pick-up) la tarifa a la tenencia vehicular es fija por un monto de ₡8000 mientras su peso bruto sea igual o superior a 8 toneladas.

De acuerdo con el Reglamento de Incentivos para el transporte eléctrico, existe también una exoneración a este impuesto para los vehículos eléctricos<sup>7</sup>. Es un descuento que se aplica durante los primeros 5 años de vida del vehículo y es gradual, exonerando el 100% el primer año, 80% el segundo año, 60% el tercer año, 40% para el 4 año y 20% el último año.

<sup>6</sup> Aplica tanto para vehículos eléctricos a batería, como para vehículos eléctricos a celda de combustible

<sup>7</sup> Aplica tanto para vehículos eléctricos a batería, como para vehículos eléctricos a celda de combustible

## Costo de financiamiento

Para este análisis se identificaron las ofertas disponibles de financiamiento por parte de los bancos públicos de Costa Rica (Banco de Costa Rica, Banco Nacional y Banco Popular) tanto para vehículos convencionales como para vehículos eléctricos. Se tomaron para el cálculo aquellas condiciones que mejor se apegaron al tipo de vehículo, así como a su uso más probable (transporte particular, público, de carga, etc). En la Tabla 1-10 se muestran un resumen del costo de financiamiento para cada tipo de vehículo.

Tabla 1-10 Costo de financiamiento de vehiculos en Costa Rica<sup>[25],[26]</sup>

Condiciones de financiamiento	Vehiculo de pasajeros	Mini bus	Bus	Vehiculo de carga ligera	Vehiculo de carga pesada
Tasa de interés	TBP+ 5-6% TBP+2.5%	TBP+ 5-6% TBP+3%	TBP+ 5-6% TBP+3%	TBP+ 5-6% TBP+3%	TBP+ 5-6% TBP+3%
Comisión por desembolso	3.25% 1.3 %	3.25% 1.5 %	3.25% 1.5 %	3.25% 1.5 %	3.25% 1.5 %
Porcentaje máximo financiable	80% 90%	80% 90%	80% 90%	80% 90%	80% 90%
Plazo del financiamiento	84 meses 84 meses	84 meses 120 meses	84 meses 120 meses	84 meses 120 meses	84 meses 120 meses
Uso del vehículo	Flotilla empresarial	Flotilla empresarial	Transporte público	Flotilla empresarial	Flotilla empresarial
Código de color: Vehículos convencionales / Vehículos eléctricos					

[25] Presidencia de Costa Rica (2019). Recuperado de: <https://presidencia.go.cr/comunicados/2019/10/bancos-publicos-anuncian-creditos-especiales-para-vehiculos-taxis-y-autobuses-electricos/>

[26] La Nación (01 de octubre de 2019) Bancos públicos lanzan créditos especiales para compra de vehículos eléctricos.

## Póliza de seguro obligatorio

La Ley de Tránsito de Costa Rica (Ley 9078) establece que todos los propietarios de vehículos deben contar con el Seguro Obligatorio para Vehículos Automotores (SOA) cuya cobertura incluya la lesión y fatalidad de las víctimas involucradas en un accidente de tránsito, exista o no responsabilidad subjetiva del conductor.

El SOA se paga mediante una póliza anual que se puede contratar con al menos 34 instituciones financieras del país. Su costo es calculado por cada institución financiera con base en el valor comercial del vehículo en el año en el que se paga la póliza.

En este estudio se identificó que en el caso de los vehículos nuevos que se pagan mediante financiamiento, el porcentaje de la cuota mensual que corresponde al costo del seguro es del 15 al 19%. Por citar un ejemplo: al adquirir un vehículo con valor de 25,000 USD a un plazo de 84 meses con un interés del 4.9%, la cuota mensual total es de 343 USD, de los cuales, 52 USD corresponden al seguro.

Mediante un análisis de ejemplos como el descrito anteriormente, se determinó que el costo de una póliza de seguro corresponde a entre 0.25 y 0.30% mensual del valor



comercial del vehículo. De esta forma, el cálculo de este rubro para los vehículos estudiados se realizó considerando su valor depreciado año tras año durante su tiempo de vida útil.

### Beneficios tributarios

El Reglamento de Incentivos al Transporte Eléctrico, conocido como Ley 9518 entró en vigencia en 2018 y tiene una duración prevista de 5 años, por lo que los descuentos a los vehículos eléctricos descritos en la sección de Costos Administrativos estarán disponibles hasta el 6 de febrero de 2023.

Considerando que Costa Rica tiene un fuerte interés en la descarbonización de su movilidad y que un esquema de estímulos a la movilidad eléctrica haría posible cumplir con su Plan de Descarbonización, se ha considerado para efectos del cálculo de CTP que estos descuentos se mantendrán en el tiempo.

### Mantenimiento

#### Buses, Vehículos de carga ligera (LDV) y de carga pesada (HDV)

Debido al nivel de desgaste, prestaciones y similitudes del servicio prestado por los buses, vehículos de carga ligera y vehículos de carga pesada, el costo de su mantenimiento fue calculado de la misma manera.

Para estos vehículos se usaron datos obtenidos del *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) de 2018 publicados en su estudio sobre buses de celda de combustible en flotas de tránsito. Los valores del costo de mantenimiento son: 0.17 USD/km para buses y camiones ICE y 0.10 USD/km para buses y camiones eléctricos a batería y de celda de combustible. (NREL, 2018)

#### Mini buses

De la misma forma que con los vehículos de pasajeros, se cotizó el mantenimiento de los mini buses con Purdy Motor de quien se obtuvieron los costos la Tabla 1-11 para el mantenimiento de un mini bus con tren motriz de combustión interna.

Tabla 1-11 Costo del mantenimiento del mini bus convencional en Costa Rica<sup>[28]</sup>

(USD)	10,000 km	20,000 km	30,000 km	40,000 km	50,000 km	60,000 km	70,000 km	80,000 km	90,000 km	100,000 km
Toyota Hiace (ICEV)	131	360	283	418	212	431	212	415	283	332

[28] Cotización por Purdy Motors – Noviembre de 2019.

Para el caso de los trenes motrices eléctrico de batería y de celda de combustible no fue posible identificar costos de mantenimiento en el mercado costarricense, debido a que no existen aún en el mercado. Por esta razón, se hizo una aproximación de estos costos, calculando la proporción entre los costos de mantenimiento de un vehículo de pasajeros y un mini bus de tren motriz convencional y se aplicó ese factor de proporción

“Mini bus / Vehículo de pasajeros” (con valor de 1.13) a los precios de mantenimiento reportados para los BEV y FCEV de pasajeros. Los resultados se muestran en la Tabla 1-12.

*Tabla 1-12 Costo del mantenimiento de los mini buses eléctrico a batería y de celda de combustible*

(USD)	10,000 km	20,000 km	30,000 km	40,000 km	50,000 km	60,000 km	70,000 km	80,000 km	90,000 km	100,000 km
Nissan e-NV200	113	209	113	235	113	209	113	235	113	209
	<b>15,000 km</b>	<b>30,000 km</b>	<b>45,000 km</b>	<b>60,000 km</b>	<b>75,000 km</b>	<b>90,000 km</b>				
Mini bus H <sub>2</sub>	407	495	407	1,121	407	495				

### Vehículos ligeros

El mantenimiento de los vehículos ligeros se cotizó con Purdy Motor en Costa Rica. Los costos de mantenimiento cotizados se reportan en la tabla 1-13.

*Tabla 1-13 Costo del mantenimiento de vehículos ligeros en Costa Rica<sup>[27]</sup>*

(USD)	10,000 km	20,000 km	30,000 km	40,000 km	50,000 km	60,000 km	70,000 km	80,000 km	90,000 km	100,000 km
Hyundai Ioniq (BEV)	100	185	100	208	100	185	100	208	100	185
Toyota Prius (híbrido)	120	265	330	250	205	389	205	610	330	434
Toyota Yaris (ICEV)	111	337	279	269	198	340	198	383	279	337
	<b>15,000 km</b>	<b>30,000 km</b>	<b>45,000 km</b>	<b>60,000 km</b>	<b>75,000 km</b>	<b>90,000 km</b>				
Toyota Mirai (FCEV)	360	438	360	992	360	438				

[27] Cotización por Purdy Motors – Noviembre de 2019.

Es importante mencionar que de acuerdo con el Anuario 2018 de Revisión Técnica Vehicular de Costa Rica, los vehículos ligeros tienen un recorrido anual de aproximadamente 12,500 km anuales, por lo que durante su vida útil de 10 años recorrerán 125,000 km aproximadamente. El costo del mantenimiento de los vehículos durante los últimos 25,000 km no cotizados por el concesionario se obtuvo haciendo

una extrapolación del costo de mantenimiento promedio por kilómetro cotizado de la Tabla 1-11.

### Energéticos

El cálculo del costo de energéticos de los vehículos analizados en este estudio se hizo con información de los fabricantes sobre la economía del combustible de sus vehículos (litros/100 km o MJ/100 km) y con proyecciones de los costos de los energéticos en Costa Rica para los siguientes 10 años que se asume como vida útil de los vehículos.

La información por tipo de combustible se detalla a continuación.

#### Combustibles fósiles: gasolina y diésel

Durante el año 2019, el Instituto Costarricense de Electricidad presentó el Plan de Expansión de Generación Eléctrica en el que hacen una proyección hasta 2034 del comportamiento del precio de insumos energéticos, como son el diésel y la gasolina. A partir de esta información, se realizó una extrapolación de la tendencia hasta 2060 para poder hacer cálculos de CTP hasta 2050.

La Tabla 1-14 muestra los precios que se pronostican y que fueron utilizados para el cálculo del CTP de los vehículos.

Tabla 1-14 Proyecciones del precio de la gasolina y el diésel en Costa Rica<sup>[29]</sup>

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
Gasolina (USD/l)	\$ 1.06	\$ 1.16	\$ 1.20	\$ 1.24	\$ 1.29	\$ 1.31	\$ 1.32	\$ 1.36	\$ 1.39
Diésel (USD/l)	\$ 0.92	\$ 1.01	\$ 1.04	\$ 1.08	\$ 1.12	\$ 1.14	\$ 1.15	\$ 1.18	\$ 1.20

[29] Instituto Costarricense de Electricidad (2019) – Plan de Expansión de la Generación Eléctrica 2018-2034

#### Electricidad

EL costo de la electricidad fue obtenido también de proyecciones del Instituto Costarricense de Electricidad en el documento que se titula "Proyecciones de la demanda eléctrica de Costa Rica 2018-2040", publicado en 2018. (ICE, 2018)

Considerando que cada tipo de vehículo estudiado podrá tener usos distintos, la recarga eléctrica de los BEV tendrá diferentes tarifas. Las tarifas identificadas como más probables son:

- a) **Vehículos de carga pesada: Tarifa industrial, media tensión.** Son vehículos de alta demanda energética. Solo dos unidades serían necesarias para satisfacer el requisito de consumo del ICE para acceder a la tarifa de media tensión

(definida por el ICE como la tarifa a la que acceden los consumidores de al menos 120,000 kWh anuales (ICE, 2020))

- b) **Buses: Tarifa industrial, media tensión (MT)**, los buses generalmente son propiedad de empresas de transporte público y por su alta demanda energética, se requieren solo 3 unidades para acceder a la tarifa de media tensión.
- c) **Vehículos de carga ligera: Tarifa industrial, baja tensión**. Al igual que los buses, se considera que los LDV serán propiedad de empresas que ya cuenten con un contrato de electricidad industrial pero que por el número de unidades (menos de 20) no podrían acceder a la tarifa de media tensión.
- d) **Mini buses: Tarifa industrial, baja tensión (BT)**. Los mini buses podrían ser propiedad de empresas o corporativos con una tarifa industrial, pero se necesitarían más de 20 unidades para alcanzar una tarifa de media tensión.
- e) **Vehículos de pasajeros de uso comercial: Tarifa residencial**, los dueños de taxis o vehículos comerciales por aplicación móvil cargarán sus vehículos en casa durante su horario de descanso.
- f) **Vehículos ligeros de pasajeros uso particular: Tarifa residencial**, se asume que los dueños de vehículos eléctricos los cargarán en su casa durante la noche.

Los valores de costo de energía y cargo por potencia, para el caso de la electricidad en media tensión, se muestran en la Tabla 1-15.

Tabla 1-15 Proyecciones del precio de electricidad en Costa Rica<sup>[30]</sup>

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
Residencial (USD/kWh)	\$ 0.148	\$ 0.155	\$ 0.163	\$ 0.171	\$ 0.180	\$ 0.189	\$ 0.198	\$ 0.206	\$ 0.215
Industrial (BT) (USD/kWh)	\$ 0.135	\$ 0.142	\$ 0.151	\$ 0.157	\$ 0.165	\$ 0.177	\$ 0.187	\$ 0.197	\$ 0.208
Industrial (MT) (USD/kWh)	\$ 0.027	\$ 0.028	\$ 0.030	\$ 0.031	\$ 0.033	\$ 0.035	\$ 0.036	\$ 0.038	\$ 0.040
Potencia (MT) (USD/kWh)	\$ 8.60	\$ 9.00	\$ 9.50	\$ 10.00	\$ 10.50	\$ 11.00	\$ 11.60	\$ 12.00	\$ 12.80

[30] Instituto Costarricense de Electricidad (2018) – Proyecciones de la demanda eléctrica de Costa Rica 2018-2040

## Hidrógeno

El costo del hidrógeno fue obtenido mediante cálculos de Costo Nivelado de Hidrógeno (LCOH por sus siglas en inglés). El LCOH se define como el costo, a valor presente, que una planta producirá durante su vida útil y que incluye todos los costos fijos y variables asociados a la cadena de valor productivo. Cuando el hidrógeno está destinado a movilidad, se considera, además de la producción, el acondicionamiento, transporte y dispensación del gas. El LCOH se calculó para este estudio mediante una herramienta propietaria de Hinicio.

De acuerdo con las tendencias internacionales de evolución de la infraestructura de producción de hidrógeno y su dispensado vehicular, se ha segmentado en dos etapas la producción y distribución del hidrógeno en Costa Rica:

- a) **2020-2035: Producción de hidrógeno on-site** mediante electricidad fotovoltaica de 7 am a 5 pm (LCOE= 60 USD/MWh) y uso de la red eléctrica en media tensión de las 5 pm a las 7 am del día siguiente (8.6 – 9.5 USD/MWh).
- b) **2035-2050: Producción de hidrógeno centralizada** a través de electricidad proveniente de plantas hidroeléctricas (LCOE= 20 USD/ MWh).

Adicionalmente, el LCOH varía dependiendo de la presión a la cual se dispensa el hidrógeno al vehículo, a a 350 bar (H35) o a 700 bar (H70). Cada fabricante decide cuál estándar de presión usar, sin embargo como regla en general los vehículos ligeros cargan hidrógeno a 700 bar para limitar el espacio que ocupa el tanque. Para este análisis hemos considerado lo siguiente:

- a) **350 bar:** Camiones de carga pesada, buses y vehículos de carga liviana
- b) **700 bar:** Minibuses y vehículos ligeros

Las proyecciones de precios de hidrógeno para su producción y dispensado se presentan en la Tabla 1-16.

*Tabla 1-16 Resultados del cálculo de LCOH para Costa Rica*

AÑO	700 bar (USD/kg)	350 bar (USD/kg)
2020	7.60	8.78
2025	6.89	7.77
2030	6.13	7.01
2035	3.71	4.62
2040	3.51	4.59
2045	3.38	4.41
2050	3.29	4.30
2055	3.27	4.26
2060	3.23	4.20

### Kilometraje anual

El kilometraje anual de los vehículos impacta directamente los costos de mantenimiento y del energético.

El modelo de cálculo de CTP de este estudio se alimentó con la información del Anuario de Revisión Técnica Vehicular (Riteve) en Costa Rica 2018, cuyos valores de kilometraje promedio por tipo de vehículo se muestran en la Tabla 1-17.

*Tabla 1-17 Recorrido anual promedio de los vehículos en Costa Rica<sup>[31],[32]</sup>*

Tipo de vehículo	Vehículo ligero particular	Vehículo ligero comercial	Mini bus	Bus	Vehículo de carga ligera	Vehículo de carga pesada
Kilometraje	12,500	39,420	18,300	65,000	18,300	44,500

[31] Anuario de la Revisión Técnica Vehicular Costa Rica 2018 – Riteve 2019

[32] Entrevistas de Hinicio con Purdy Motor en Costa Rica – Octubre 2019

El valor reportado para el vehículo de pasajeros en el anuario de Riteve es de 14,500 km, sin embargo este valor considera tanto a los taxis como a los vehículos particulares. Mediante una entrevista con Purdy Motor se determinó que 12,500 km anuales es un valor más realista para los vehículos particulares. El kilometraje anual de los taxis se obtuvo de considerar un promedio de 120 km/día de conducción de un taxi<sup>[33]</sup> con una disponibilidad del 90% anual.

[33] El Mundo, Costa Rica Agosto, 05. 2019 Primera experiencia con taxi eléctrico: Gasto semanal bajó de ¢80 mil en diésel a ¢10 mil en electricidad. Disponible en: <https://www.elmundo.cr/costa-rica/primera-experiencia-con-taxi-electrico-gasto-semanal-bajo-de-¢280-mil-en-diesel-a-¢10-mil-en-electricidad/>

### Aumento en la eficiencia de los sistemas de celda de combustible

Los sistemas de celdas de combustible de hidrógeno se encuentran en un momento de desarrollo que les permite ser parte de aplicaciones reales pero que, por su naturaleza fisicoquímica, aún tienen un amplio rango de mejora.

El aumento en la eficiencia de los sistemas de celdas de combustible tiene un impacto significativo en el consumo del combustible, por lo que se ha considerado una mejora en su eficiencia del 20% de 2020 a 2050, lo cual coincide con los pronósticos de los fabricantes y centros de desarrollo.

Para las baterías no se ha considerado un aumento de eficiencia porque a pesar de que nuevas tecnologías podrían ser desarrolladas, las baterías electroquímicas utilizadas hoy en día tienen ya eficiencias muy altas (cerca de 90%). Las mejoras que se esperan para las baterías están relacionadas con la disminución de peso, más que con el aumento de su eficiencia de almacenamiento energético.

## 1.5. Resultados del CTP

En esta sección se muestran los resultados obtenidos para el Costo Total de Posesión (CTP) en cada segmento vehicular en Costa Rica en 2020 y su proyección hasta 2050.

Cabe destacar que **el análisis de ha hecho para una combinación específica de tres vehículos para cada segmento** (ICEV, BEV y FCEV), y por lo tanto, **no se deben asumir los mismos resultados para otras combinaciones usando otros modelos vehículo**. Las incertidumbres que se presentarían al intentar generalizar las conclusiones dentro de un mismo segmento no han sido tomadas en cuenta en el alcance de este estudio.

El análisis se ha realizado bajo un escenario "Business as Usual" (supuestos de la [sección 2.1.](#)) es decir, considerando que los precios de los vehículos eléctricos disminuirán de forma conservadora, que los energéticos seguirán un comportamiento de acuerdo al proyectado por el Instituto Costarricense de Electricidad. (ICE, 2019a)

Se asume que el gobierno de Costa Rica no dará apoyo adicional al que existe en 2020 para favorecer la penetración de los vehículos eléctricos de baterías o de celda de combustible.

No se considera la incorporación de incentivos a la importación de tecnologías estacionarias para la movilidad eléctrica (cargadores eléctricos, equipo de regulación eléctrica, electrolizadores, etc.).

### Camiones de carga pesada

La movilidad cero emisiones en los segmentos de carga pesada se prevé que esté fuertemente **dominada por la tecnología de celda de combustible (FCEV)** en los años a venir. Esto se debe principalmente a que:

- Generalmente este tipo de vehículos recorren largas distancias (más de 300km/día), por lo que las autonomías de los vehículos a batería no serían suficientes.
- Existe una gran incertidumbre frente a la disponibilidad comercial de camiones BEV en el corto-mediano plazo (ver sección 1.3.).
- La carga total efectiva a transportar en los camiones de carga a baterías disminuiría considerablemente (-33%) frente a la de un camión convencional a diésel (ver sección 1.3.).

En la figura 1-8 se puede observar cómo los camiones de carga pesada FCEV serían competitivos en CTP los convencionales a diésel (ICEV) en los próximos 5 años. Este análisis asume un recorrido de **98,500 km/año (≈ 300 km/día)** y una vida útil de 10 años.

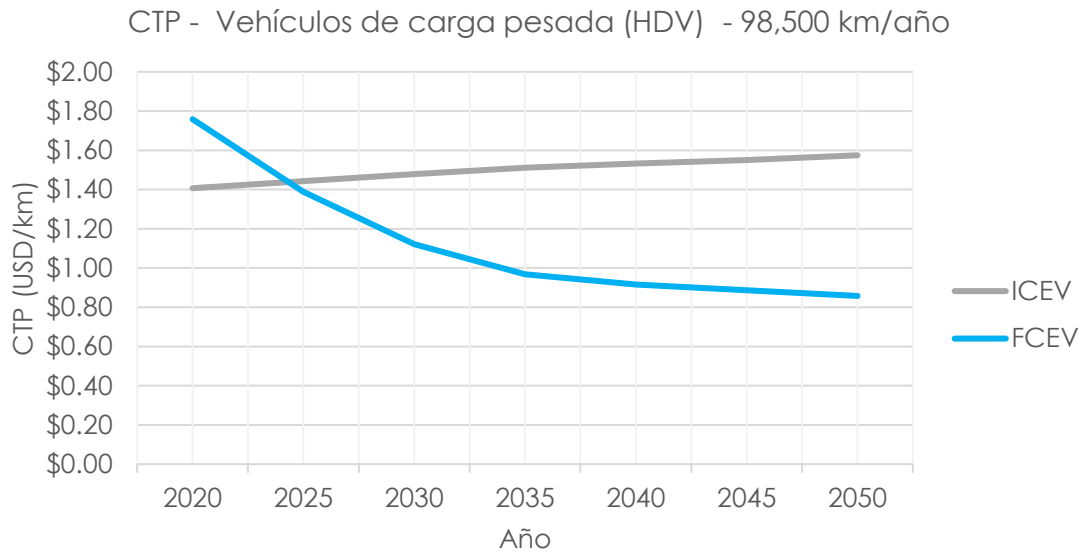


Figura 1-8 Proyección de CTP de vehículos de carga pesada para trayectos de >300km/día

Nota. La Figura 1-12 no muestra el tren motriz BEV, ya que para estos recorridos, los BEV no serían técnicamente viables (autonomía insuficiente).

Asumiendo que a futuro exista una oferta tecnológica de camiones de carga pesada a batería (BEV), estos podrían resultar técnicamente viables para distancias más cortas (44,500 km/año, promedio reportado en el RITEVE), ya que sus autonomías deberían ser suficientes para cubrir estos trayectos (aproximadamente 135 km/día).

La figura 1-9 muestra el CTP para camiones de carga para estos recorridos más cortos (44,500 km/año) expresado en USD/km-tonelada sobre una base de 23 toneladas de carga para el ICEV (máximo permitido por el Reglamento sobre Vehículos de Carga), y menores capacidades de carga para las opciones eléctricas, tal como se explicó en la sección 1.2 (15.4 toneladas para el BEV y 21.1 toneladas para el FCEV).

Se puede observar cómo actualmente los camiones de carga pesada a baterías serían competitivos en CTP con los camiones a diésel, de estar disponible la tecnología. Sin embargo, a partir de 2035, los FCEV se harían más competitivos que los BEV, debido principalmente a que la mayor capacidad de carga de mercancías de los FCEV frente a los BEV lograría compensar los mayores precios de adquisición esperados para los FCEV.



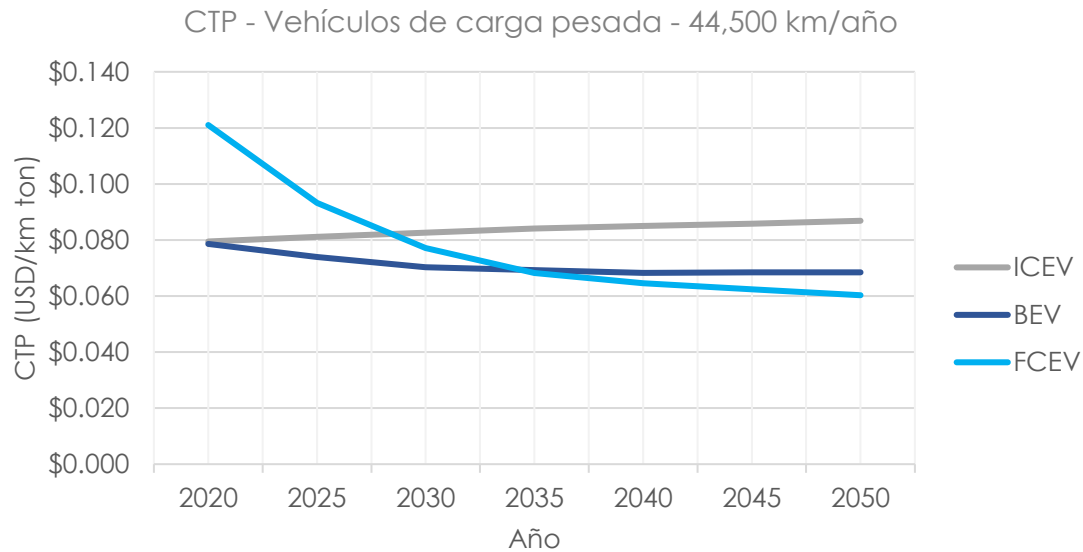


Figura 1-9 Proyección del CTP 2020 - 2050 de HDV expresado en USD/km ton

A pesar de la menor competitividad económica de los FCEV frente a los BEV hasta la década del 2030, los operadores de flota que tomen decisiones de reemplazo de sus camiones diésel por alternativas cero emisiones en los próximos 10 años probablemente se inclinarían por una opción FCEV, ya que estos les permitirían una mayor versatilidad: la posibilidad de operar tanto en rutas cortas, como en largas distancias, y con mayor capacidad de carga de mercancías.

### Buses

La movilidad cero emisiones en los segmentos de buses se espera que tenga una **combinación entre tecnologías de batería y de celdas de combustible**, que estará **determinada principalmente las distancias a recorrer**, así:

- Trayectos largos (>250km/día) y operación intensiva: Se espera que dominen los buses FCEV. Aproximadamente el 30% de los buses en Costa Rica son interurbanos. Varias de esas rutas, así como los buses urbanos de uso intensivo, no se podrían cubrir con BEV debido a una autonomía insuficiente (ver sección 1.3.)
- Trayectos cortos (<250km/día) y operación no intensiva: Se espera que dominen los buses a baterías (BEV) debido a su mayor competitividad económica.

La figura 1-10 muestra que los buses a celda de combustible alcanzarían paridad con los buses convencionales en Costa Rica en esta década. No se incluye una comparativa con los buses a baterías, ya que estos últimos no serían técnicamente viables en este segmento, debido a la insuficiente autonomía.

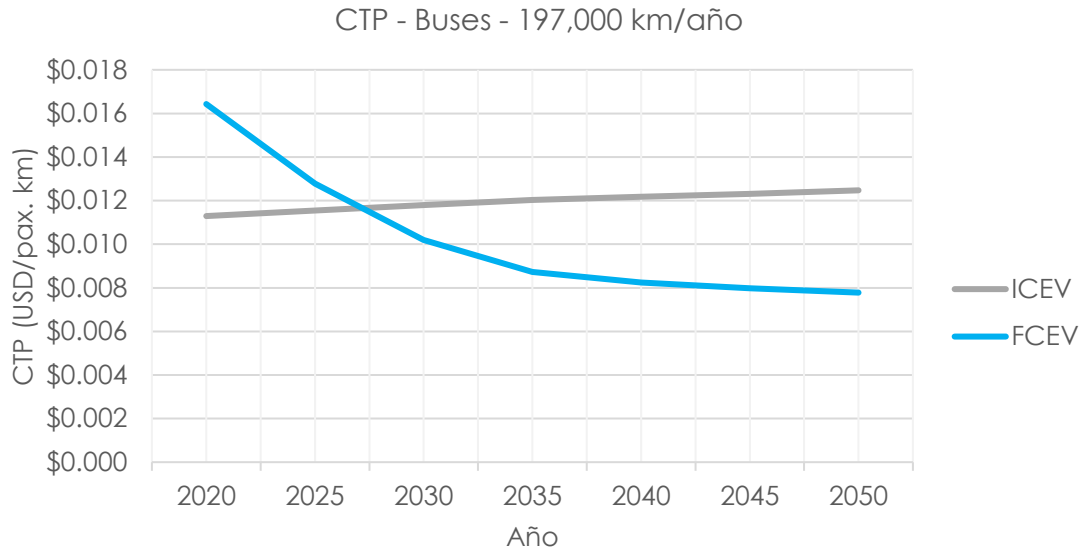


Figura 1-10 Proyección del CTP de buses para recorridos de larga distancia

Nota. La Figura 1-10 no muestra el tren motriz BEV, ya que para estos recorridos, los BEV no serían técnicamente viables (autonomía insuficiente).

Cuando se toman recorridos cortos (en este caso los recorridos promedio para buses reportados por el RITEVE de 200 km/día), se observa que los buses eléctricos a batería serían hoy más económicos de operar que los buses tradicionales a combustión, y que los buses a celda de combustibles solo alcanzarían paridad con los buses a batería en la década del 2040.

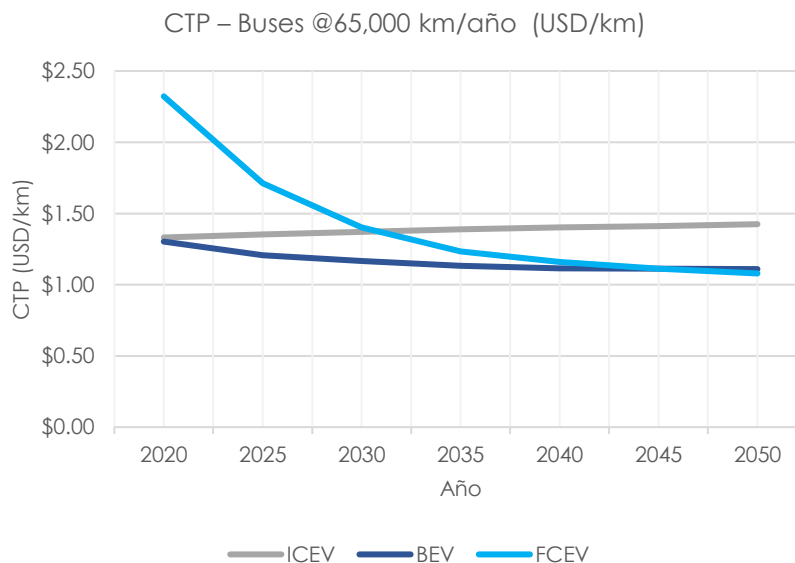


Figura 1-11 Proyección del CTP de buses para recorridos de corta distancia en dólares por kilómetro

Sin embargo, como se explicó en la [sección 1.3](#), es importante tener en cuenta que los buses a batería tienen una menor capacidad de pasajeros. Si se toma esto en cuenta, se observa (figura 1-12) que los buses a celda de combustible, inclusive en estos recorridos cortos, serían el segmento más competitivo a partir de la década del 2030.

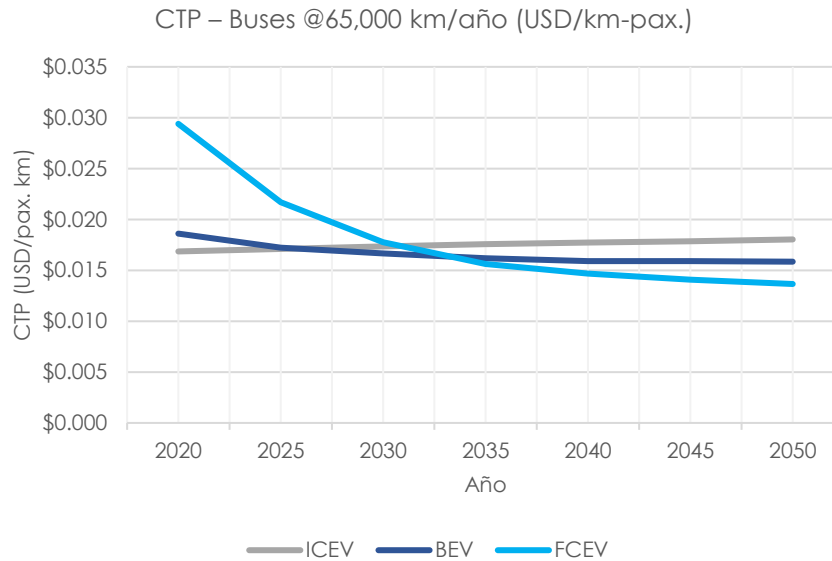


Figura 1-12 Proyección del CTP de buses para recorridos de corta distancia en dólares por kilómetro y pasajero transportado

Los análisis anteriores implican que la decisión de compra de buses cero emisiones en esta década para recorridos cortos en Costa Rica deberán tomar en cuenta la afluencia de pasajeros esperada:

- Cuando se trate de rutas de alta demanda de transporte, se recomienda elegir buses a celda de combustible, ya que el uso de buses a baterías podría implicar la compra de unidades adicionales para satisfacer la demanda.
- Para rutas de baja afluencia, los BEV serán la opción más competitiva en esta década.

### Vehículos de carga ligera

La movilidad cero emisiones en los segmentos de carga ligera (< 4 ton) en Costa Rica se espera que tenga una **combinación entre tecnologías de batería y de celdas de combustible**, las cuales presentarían CTPs muy similares de aquí a 2050 (figura 1-13).

La decisión de compra estará determinada principalmente por los tamaños de flota y sus intensidades de uso, así:

- Flotas de hasta ≈20 camiones: los FCEV serían más competitivos

- Flotas de más de  $\approx 20$  camiones, en recorridos cortos ( $<160$  km/día) y operación baja en intensidad: los BEV obtendrían acceso a tarifas de media tensión por lo que podrían resultar más competitivos

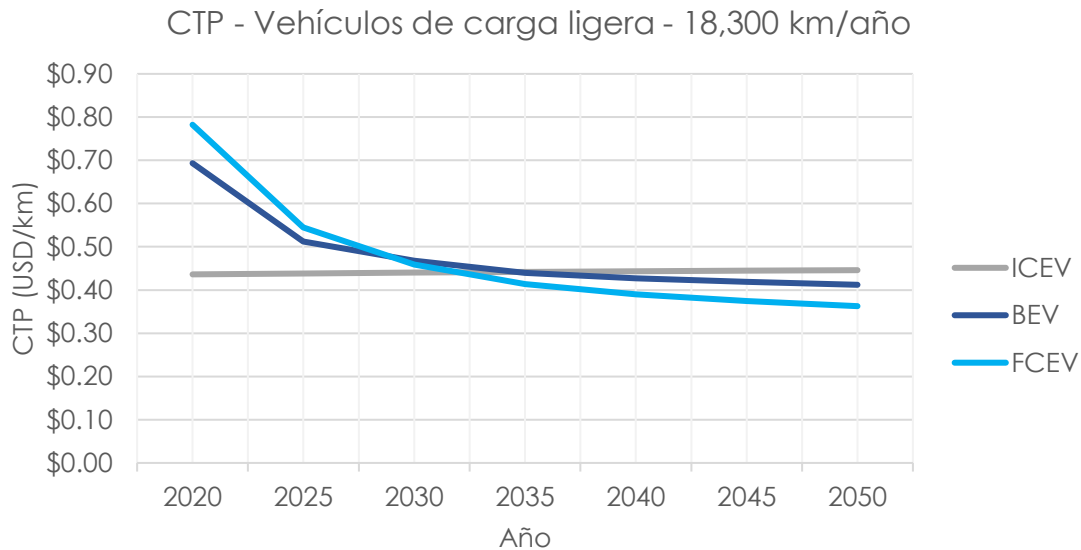


Figura 1-13 Proyección de CTP para vehículos de carga ligera

Las grandes similitudes en CTP en este segmento se deben principalmente a:

- La proporción de potencia FC/batería a bordo del FCEV es más pequeña para estos vehículos de carga ligera que para otros segmentos presentados en este informe. Aquí la celda de combustible funciona como extensor de rango, y no como el elemento principal en la tracción del vehículo.
- Economías del energético:
  - FCEV: Este tipo de vehículo carga hidrógeno a 350 bar, lo que resulta más económico que el hidrógeno a 700 bar que usan los segmentos ligeros.
  - BEV: Se asume que estos vehículos se cargarán en baja tensión, ya que para acceder a los beneficios de una menor tarifa en media tensión, se necesitarían flotas de más de 20 unidades, lo que probablemente no sería un caso común. Para grandes tamaños de flota, se recomienda realizar un análisis con tarifas de media tensión, lo que resultaría en CTPs más bajos para los BEV.

### Mini buses

La movilidad cero emisiones para minibuses en Costa Rica se prevé que esté fuertemente **dominada por la tecnología de baterías (BEV)** en los años venideros. Esto se debe principalmente a que, si bien por sus dimensiones son parecidos a los vehículos

de carga ligera, su configuración interna para transporte de pasajeros permite un menor espacio para alojar su sistema energético, por lo que los FCEV deben ser llenados con hidrógeno a más alta presión (700 bar), perdiendo competitividad económica frente a los BEV.

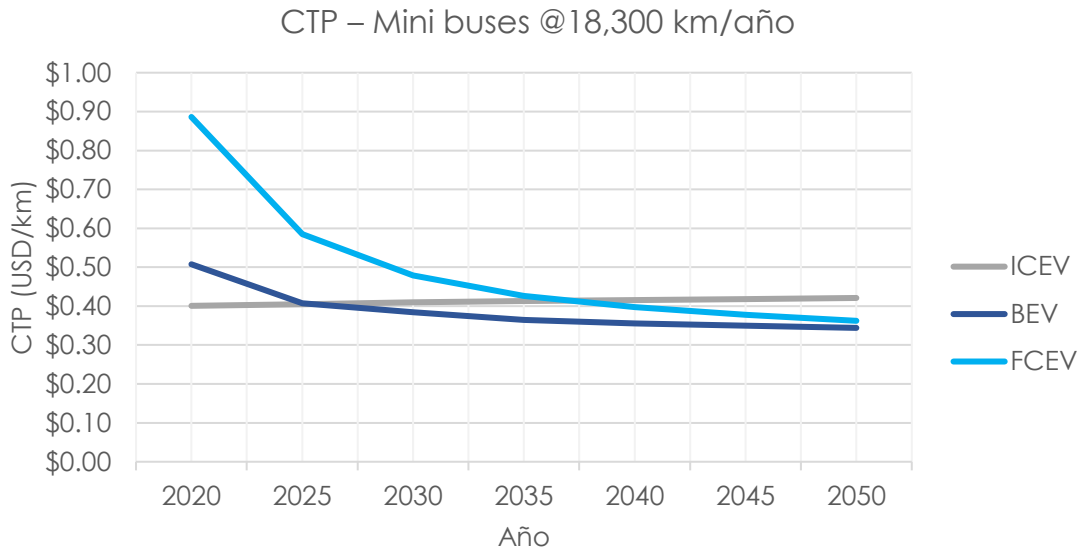


Figura 1-14 CTP de mini buses con diferentes trenes motrices en 2020

Se espera una competitividad de los BEV frente a los minibuses convencionales hacia mediados de esta década.

Los minibuses a celda de combustible no alcanzarían paridad en CTP con los minibuses a baterías en el periodo analizado. Esto se debe a que la demanda energética en este segmento no es tan alta como en los buses, por lo que no se espera una reducción significativa en el número de pasajeros transportado en un minibús BEV, y en consecuencia, no hay escenarios donde los FCEV pudieran ser competitivos en recorridos de 60 km/día. Sin embargo, esto no descarta su adopción a Costa Rica, solo los convierte en una opción para cubrir nichos donde la necesidad de autonomía sea alta, o se requieran cortos tiempos de recarga, por ejemplo, shuttles turísticos, transporte en aeropuertos, etc.

### Vehículos ligeros

La movilidad cero emisiones para vehículos ligeros (automóviles) en Costa Rica se prevé que esté fuertemente **dominada por la tecnología de baterías (BEV)** en los años venideros.

Los vehículos ligeros son el sector menos competitivo para los vehículos a celda de combustible, debido principalmente a dos factores:

- Los precios de adquisición de los FCEV son significativamente más altos que los BEV en estos segmentos

- Se prevé un costo de energético también mayor, ya que, para llevar un tanque más pequeño a bordo, estos vehículos cargan hidrógeno a alta presión (700 bar), el cual es más costoso que el hidrógeno a 350 bar que usan los vehículos pesados.

La penetración de los vehículos ligeros a celda de combustible en Costa Rica se prevé como una opción para los nichos donde la demanda de autonomía sea alta o se requieran cortos tiempos de recarga (taxis 24/7, servicios de seguridad pública, etc.).

La figura 1-15 muestra que el aumento de kilometraje de los vehículos comerciales (taxi, Uber) frente a los de uso particular aumenta la competitividad de los FCEV frente a los vehículos convencionales en 7 años. Sin embargo, en el año 2050 el CTP de los FCEV sería todavía 20% mayor al del vehículo BEV, por lo que siempre que la disponibilidad de los BEV sea suficiente para satisfacer la operación, se recomienda optar por esta tecnología en el segmento ligero.

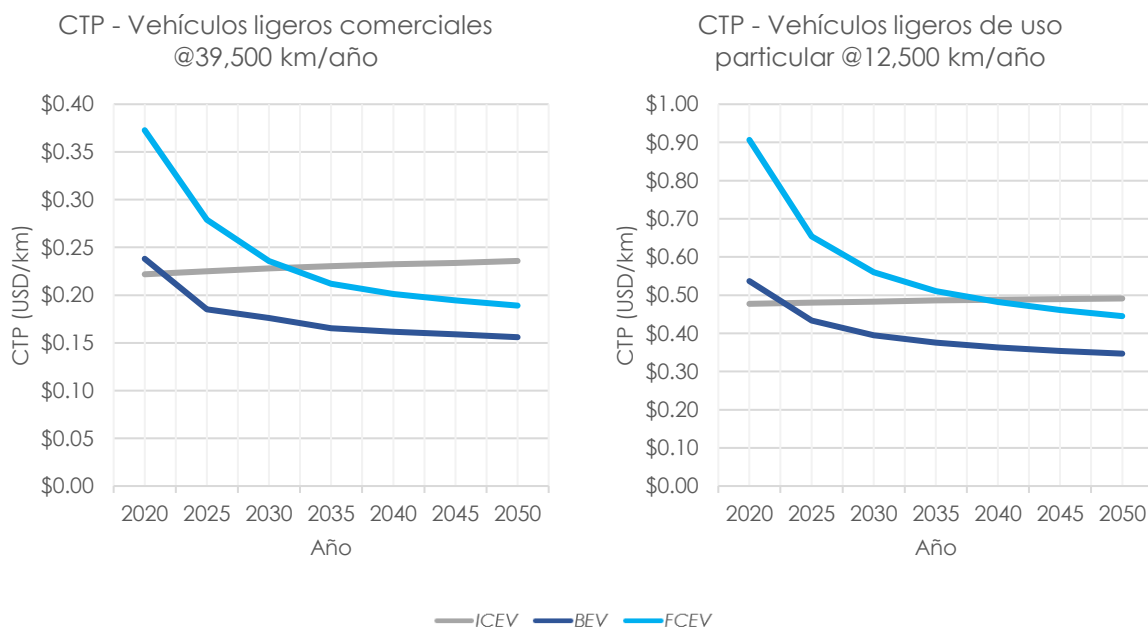


Figura 1-15 Proyección del CTP de vehículos ligeros particulares y comerciales

## 1.6. Sensibilidad a las principales variables que influyen en el CTP

### Kilometraje

Con el objetivo de cuantificar el impacto en el CTP de las distancias recorridas, se hizo un análisis de sensibilidad aumentando el kilometraje de los vehículos estudiados para el año 2020.

La figura 1-16 muestra, para dos de los segmentos analizados, un aumento desde el promedio reportado por RITEVE hasta un 120% adicional, lo que resulta en CTPs (en USD/km) casi 50% menores.

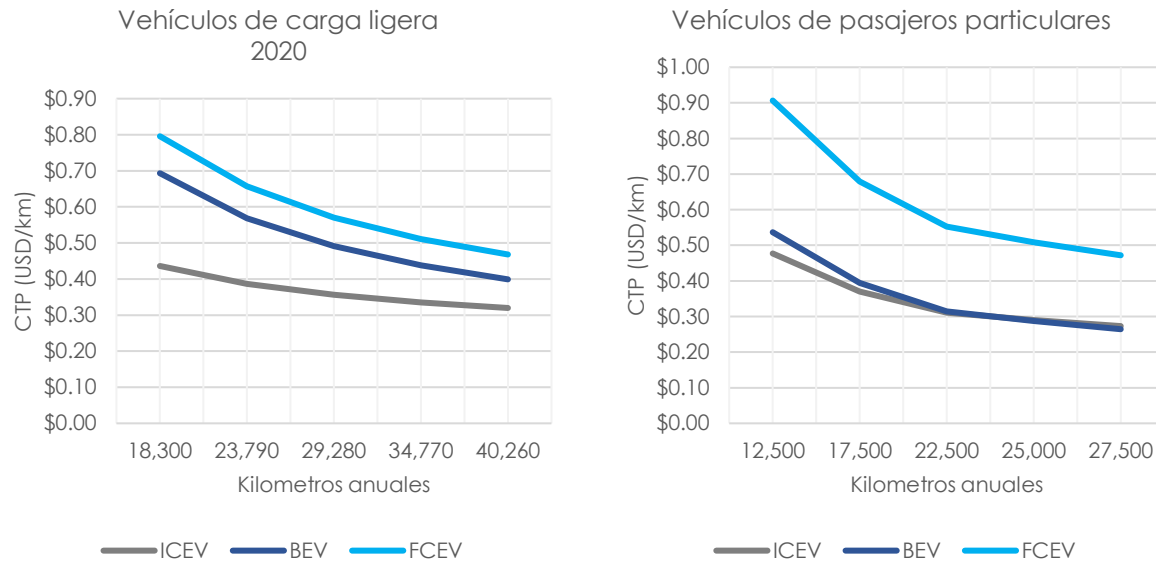


Figura 1-16 Análisis de sensibilidad por cambio de kilometraje en LDV y vehículos de pasajeros comerciales

De la variación en el kilometraje se observa que los vehículos eléctricos (tanto BEV como FCEV) se deben impulsar principalmente para su uso en largos recorridos (flotas comerciales), donde se obtiene mayor competitividad económica frente a los vehículos convencionales. Los vehículos eléctricos presentan mejores economías bajo esquemas de uso compartido y similares, los cuales maximizan la utilización del vehículo.

### Incentivos fiscales

Uno de los mecanismos más utilizados en el mundo para la promoción del uso de tecnologías alternativas en la movilidad es la reducción o exoneración de impuestos. La Ley 9518 de Costa Rica otorga descuentos en los impuestos selectivos de consumo, IVA y tenencia vehicular, así como una exoneración total del impuesto a la importación de los vehículos eléctricos.

Para el análisis de sensibilidad de los impuestos ante el CTP se revisaron dos casos: el primero es el impacto que los estímulos actuales tienen sobre los vehículos eléctricos de batería y de hidrógeno y el segundo, el impacto que podría tener un caso extremo de exoneración 100% de impuestos para la movilidad eléctrica.

#### a) Impacto de la Ley 9518

Los descuentos al IVA y al Impuesto Selectivo de Consumo, en los vehículos eléctricos, se otorgan por segmentos de precios de manera escalonada, beneficiando hasta con 100% descuento a los vehículos más baratos, y tasando porcentajes de descuento menores conforme los vehículos aumentan su valor. Estos impuestos se pagan una sola vez, al momento de adquirir el vehículo.

Por su parte, La Ley 9518 también prevé un incentivo frente al impuesto a la tenencia vehicular, otorgando un descuento gradual durante los primeros cinco años de los vehículos particulares, mientras que, para los vehículos comerciales de pasajeros o carga, representa una cuota fija anual durante la vida útil del vehículo (tanto para ICEV como para eléctricos).

En la Tabla 1-18 se muestra la contribución porcentual de los impuestos al CTP de dos vehículos seleccionados en BEV y FCEV. En ella se puede apreciar que, para los vehículos eléctricos de menor tamaño y menor costo de adquisición, el beneficio de la Ley 9518 puede ser hasta del 22% del CTP. Sin embargo, en los vehículos con CAPEX altos tales como los buses, a pesar de que el beneficio es mayor en términos absolutos, apenas logra representar un 5% del CTP.

*Tabla 1-18 Evaluación del impacto de la Ley 9518*

Contribución del impuesto al CTP (%)	Automóviles				Buses			
	BEV Hyundai Ioniq		FCEV Toyota Mirai		BEV Solaris Urbino 12		FCEV - Van Hool A330	
	Ley 9518	Sin incentivo	Ley 9518	Sin incentivo	Ley 9518	Sin incentivo	Ley 9518	Sin incentivo
IVA	0.86%	5.91%	2.50%	5.61%	4.36%	4.74%	4.34%	4.45%
Impuesto a la importación	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.82%	0.00%	1.71%
Impuesto selectivo de consumo	0.99%	13.63%	2.89%	12.94%	9.02%	10.22%	9.13%	9.59 %
Impuesto a la tenencia vehicular	5.49%	7.83%	5.18%	7.71%	0.02%	0.02%	0.01%	0.01%
Descuento con Ley 9518 respecto al escenario sin estímulos. (%)	22%		18%		4%		5%	
Descuento en CTP total con Ley 9518 respecto al escenario sin estímulos. (USD)	\$18,499		\$24,126		\$34,525		\$72,332	

Teniendo en cuenta que el Plan de Descarbonización de Costa Rica tiene como uno de sus objetivos, lograr que la población costarricense disminuya el uso de vehículos particulares y use más el transporte público, resultaría conveniente eliminar el escalonamiento del esquema de incentivos (o reconfigurar los escalones) para que el beneficio lograra tener un impacto mayor en el CTP de los vehículos de transporte público.

b) Exoneración 100% de impuestos

El caso hipotético de la exoneración de impuestos al 100% a los vehículos eléctricos, tanto BEV como FCEV, supone la eliminación de los impuestos de importación (o fabricación si fuera el caso), compra, y tenencia vehicular.



La figura 1-17 muestra la comparación del CTP de vehículos ligeros particulares y buses entre el caso actual, con beneficios de la Ley 9518, y el supuesto de eliminación del 100% de impuestos. En ella se aprecia que el impacto de la exoneración de impuestos es mayor cuanto mayor sea el costo de adquisición de los vehículos, representando un ahorro de 13% para los buses BEV y en el año 2020.

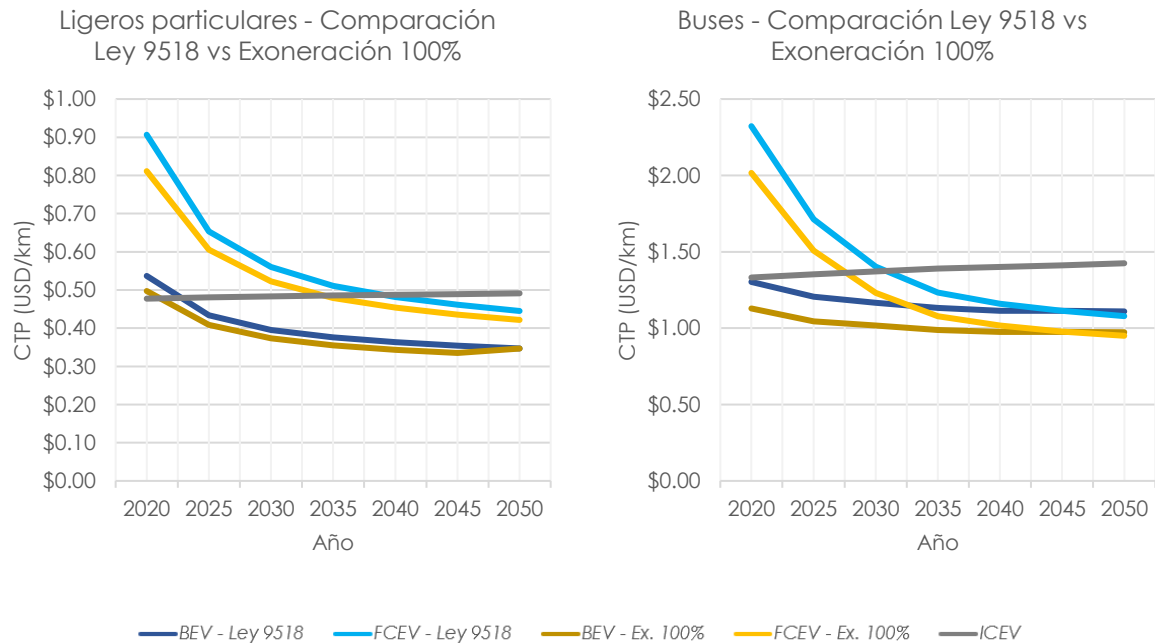


Figura 1-17 Análisis de sensibilidad por exoneración al 100% de impuestos a los vehículos eléctricos

Para los segmentos ligeros, la Ley 9518 brinda un ahorro en el CTP considerable, que si bien no da paridad de costos con los vehículos ICEV en todos los segmentos, contribuye a que se logre en esta década.

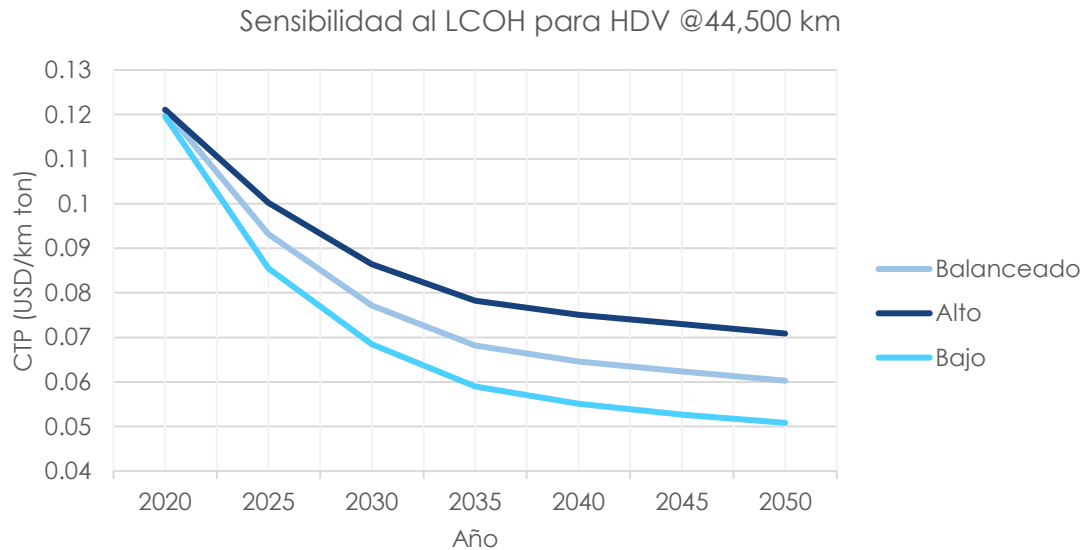
Para los sectores de carga pesada y buses, la Ley 9518 tiene una estructura de descuentos que no los favorece. Por la naturaleza de estos vehículos, su CAPEX es mucho mayor que el de los vehículos ligeros, por lo que un régimen de beneficios diferenciado para ellos sería conveniente.

### Costo nivelado de hidrógeno

EL consumo de hidrógeno es el segundo componente que más contribuye al CTP de los FCEV después del precio de los vehículos. Para este análisis de sensibilidad se varió la curva de decremento en el costo nivelado del hidrógeno (por sus siglas en inglés) de 350 bar en tres escenarios:

- a) Escenario alto: de 7.60 (2020) a 3.48 (2050) USD/kg H<sub>2</sub>
- b) Escenario Business as Usual: de 7.60 (2020) a 3.23 (2050) USD/kg H<sub>2</sub>
- c) Escenario bajo: de 7.60 (2020) a 3.05 (2050) USD/kg H<sub>2</sub>

La figura 1-18 muestra el resultado de CTP para los vehículos de carga pesada, que es el segmento de mayor consumo de energético. Se puede observar que una diferencia menor al 10% en el LCOH de 2050 tiene un impacto de entre 15 y 20% en el CTP.



*Figura 1-18 Análisis de sensibilidad al LCOH en vehículos de carga pesada.*

Considerando que el LCOH tiene tan importante participación en el CTP de los FCEV, cuidar aspectos como el costo de energía para producción de hidrógeno e impuestos a la importación y operación de equipos de producción y gestión de este gas (electrolizadores, compresores, tanques, etc.) serán de gran importancia para facilitar la penetración de los FCEV en Costa Rica.

En la figura 1-19 se pueden observar las trayectorias que el costo nivelado de hidrógeno para vehículos de carga pesada (HDV) debería seguir para tener para que el FCEV tuviera paridad de CTP con el ICEV o con el BEV.

En 2020 el costo de adquisición de las unidades FCEV es aún tan alto que incluso con hidrógeno de costo cero podrían ser más costosos que otras tecnologías, por lo cual, las líneas comienzan en 2025.

La gráfica denota cómo, hasta 2031, el costo nivelado de hidrógeno será mayor al que permite una competitividad de CTP entre el camión a celda de combustible y el camión convencional a diésel (5.75 USD/kg H<sub>2</sub>), es decir, entre hoy y el 2031 se deben realizar esfuerzos para conseguir costos de hidrógeno más bajos (ej. Estímulos fiscales para la producción de hidrógeno).

Si quisiéramos comparar con los camiones de carga pesada a baterías (solo viables para recorridos cortos), hasta el año 2035 se deberían realizar esfuerzos para lograr un costo de hidrógeno (3.80 USD/kg H<sub>2</sub>) que logre la paridad en CTP entre el camión de carga a celda de combustible y el de baterías.

Esta información es útil para la generación de política pública que promueva un decremento acelerado del precio de hidrógeno mediante incentivos tales como la reducción en impuestos y aranceles a equipos de producción de hidrógeno, y regímenes especiales de tarifas eléctricas para producción de hidrógeno.

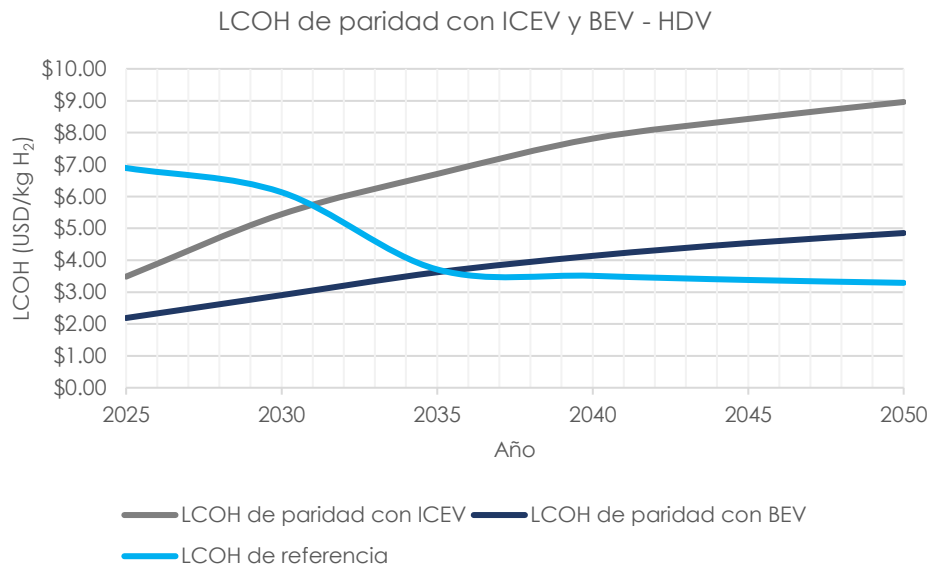


Figura 1-19 LCOH para la paridad de HDV de tipo FCEV con ICEV y BEV.

### Incertidumbres en evolución de parámetros clave

Para ejemplificar el impacto en el CTP por la incertidumbre en la evolución de una variable, El cálculo de CTP en prospectiva tiene asociado un rango de incertidumbre para cada parámetro costeadado en el futuro. Cambios en las condiciones del mercado, oferta tecnológica, eventos políticos o sociales, como los que se han vivido durante 2020 ante la pandemia global por COVID-19 pueden impactar precios de combustibles, de vehículos o incluso las condiciones de importación-exportación de vehículos entre países.

se eligió el CAPEX de los autobuses. Se tomó el rango de precios en que actualmente es posible encontrar buses BEV y FCEV de la misma tecnología y de las mismas prestaciones, para proyectar el comportamiento del CTP.

Los rangos de CAPEX utilizados se obtuvieron de un análisis de precios de diversos fabricantes, así:

- BEV: 295,000 a 345,000 USD
- FCEV: 478,000 a 561,000 USD

El resultado se muestra en franjas de CTP, en las que un punto de cruce con otra línea se convierte en un rango de CTP o un lapso de tiempo.

Se observa que la paridad de CTP entre los buses a batería y los convencionales comenzaría entre 2020 y 2022. Los buses a celda de combustible alcanzarían paridad con los de batería entre 2034 hasta 2050 (figura 1-20).

Debido a los altos rangos de incertidumbre que quedan demostrados con este ejemplo, así como al gran número de variables consideradas en los análisis de CTP, se recomienda utilizar los resultados de este informe solo como indicativos. Las decisiones de adquisición de flotas de una u otra tecnología deberán ser basadas en un modelado económico para cada proyecto específico.

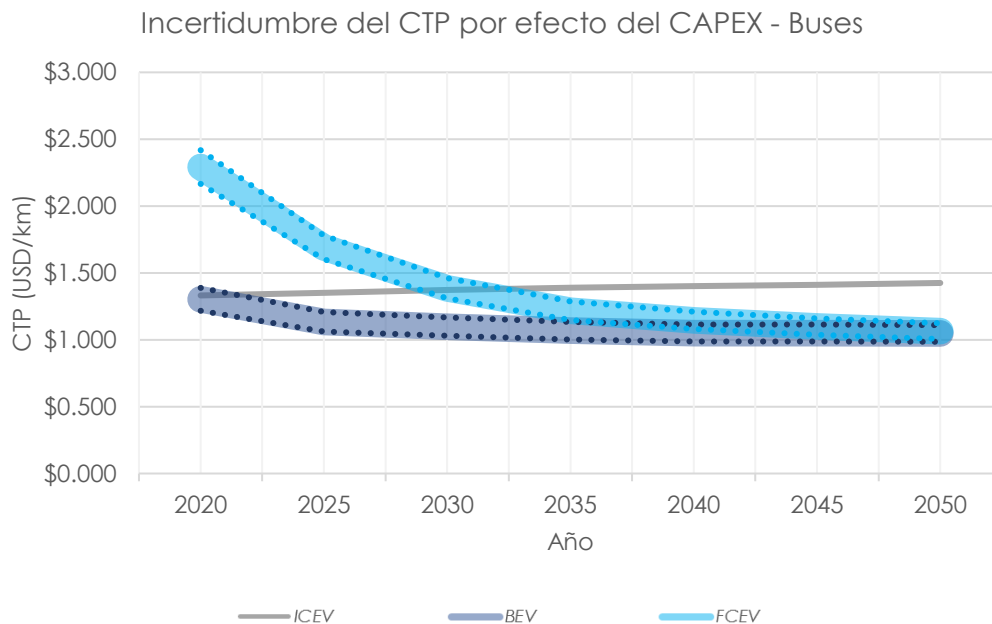


Figura 1-20 Incertidumbre del CTP de buses asociada al CAPEX de BEV y FCEV.

## 2. Escenarios de Penetración de BEV y FCEV en Costa Rica a 2030 y 2050

### 2.1. Contexto y consideraciones para la producción de escenarios

Esta sección tiene como objetivo proyectar la potencial penetración de vehículos eléctricos, tanto a baterías como a celda de combustible, en la flota vehicular costarricense.

La penetración de los vehículos eléctricos en los diferentes países del mundo esta dictada por múltiples factores que incluyen: el precio de los vehículos en el destino, despliegue de infraestructura de recarga, estímulos fiscales, promoción o barreras políticas, etc. Para este estudio, se realizaron tres posibles escenarios de despliegue de movilidad eléctrica en Costa Rica en el periodo 2020 - 2050:

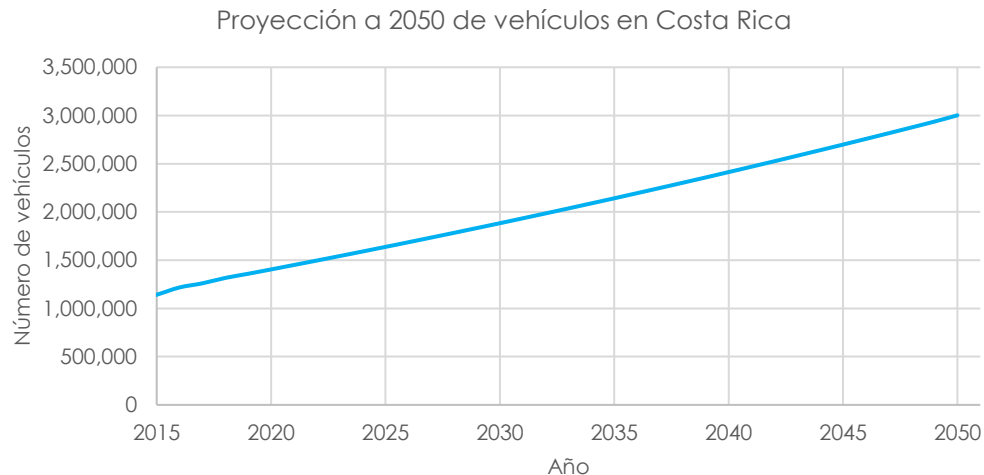
- **Escenario Business as Usual:** asume la continuidad de las tendencias actuales del mercado de la movilidad eléctrica a nivel global.
- **Escenario Hydrogen Breakthrough:** asume un despliegue donde los FCEV predominarían sobre los BEV debido a una más rápida caída en precios de estos vehículos y sus componentes, así como favorabilidad en las condiciones de producción de hidrógeno.
- **Escenario Battery Breakthrough:** asume un despliegue donde los BEV predominarían sobre los FCEV debido a una más rápida caída en precios de estos vehículos y sus componentes.

Para la generación de los tres escenarios se consideraron factores comunes a todos ellos y factores particulares para cada uno, los cuales se enumeran a continuación.

#### Supuestos comunes

##### *Crecimiento de la flota*

Independientemente de la electrificación del transporte, la población de Costa Rica está en aumento y sus necesidades de transporte de pasajeros y de mercancías van en aumento. Por ello, se realizó una proyección del aumento de la flota partiendo del crecimiento de la población de Costa Rica (INEC, 2008) (que aumentará 20% de 2020 a 2050) y del aumento en la posesión de vehículos (de 270 en 2020 a 500 en 2050) (RITEVE, 2018) (figura 2-1).



*Figura 2-1 Proyección de crecimiento de flota vehicular en Costa Rica (2020-2050)*

La distribución de la flota por tipo de vehículo se proyectó de acuerdo a la tendencia de aumento en el uso del transporte público y servicios de renta de vehículo por aplicación, resultando hacia 2050 una mayor proporción de vehículos ligeros comerciales, mini buses y buses respecto a la distribución 2020.

Para los tres escenarios de penetración se asumió la misma distribución de flota y tamaño de flota en el tiempo.

### *Plan de Descarbonización*

El Plan de Descarbonización de Costa Rica (Presidencia\_CR, 2019) establece los siguientes objetivos:

- 2035
  - 70% de los buses y taxis serán eléctricos
  - 25% de los vehículos eléctricos serán eléctricos
- 2050
  - 100% de los buses y taxis serán eléctricos
  - 60% de los vehículos ligeros serán eléctricos
  - 50% del transporte de carga será eficiente energéticamente y reducirá al menos 20% de sus emisiones respecto a 2018

Los tres escenarios de penetración asumen el cumplimiento de las metas de este Plan. La variación entre escenarios se da por la proporción entre BEV y FCEV. Para el caso del transporte de carga, se asume que la totalidad de la flota que el Plan denomina "eficiente" serán eléctricos, y se realiza también una segmentación entre los BEV y FCEV.

## *Disponibilidad de infraestructura de recarga/abastecimiento*

Tanto los BEV como los FCEV requerirían del despliegue de infraestructura de recarga/abastecimiento que permitiera que los nuevos usuarios de estas tecnologías pudieran tener una experiencia de uso continuo de los vehículos con suficiente cobertura geográfica. Para la generación de estos escenarios de penetración se asume que la infraestructura de recarga/abastecimiento estará disponible en Costa Rica para ambas tecnologías eléctricas en cada momento.

### *CTP como herramienta principal*

A pesar de que se consideran elementos técnicos de cada tipo de vehículo tales como las autonomías disponibles, así como ejemplos de su penetración en otros lugares del mundo para realizar una propuesta comparable en Costa Rica, se ha hecho una especial consideración del CTP calculado en la sección 1, como herramienta principal para identificar los momentos en los cuales se da una adopción acelerada de cada tipo de vehículo, según los puntos de cruce de paridad de CTP entre diferentes tecnologías.

### Supuestos específicos por escenario

#### *Evolución del CAPEX de BEV y FCEV*

Se consideró una curva de decremento de CAPEX diferente para los BEV y FCEV en cada escenario y por cada tipo de vehículo.

El escenario *Business as Usual* consideró el decremento que las tendencias actuales muestran para los vehículos: hasta un 50% de reducción para los BEV y hasta 55% para los FCEV.

El escenario *Hydrogen Breakthrough* considera que los FCEV están en un momento más temprano de desarrollo que los BEV, por lo que su decremento en CAPEX podría ser mayor hacia 2050. Se plantea hasta 60% de reducción para los FCEV y hasta 45% para los BEV de 2020 a 2050.

En el escenario *Battery Breakthrough* se plantea la posibilidad de que el desarrollo tecnológico de las baterías o el hallazgo de reservas de minerales que las componen hagan que los BEV disminuyan su costo más rápidamente que los FCEV. Se considera hasta 55% de reducción de costos para los BEV y solo hasta 40% de reducción para los FCEV de 2020 a 2050.

#### *Costo Nivelado de Hidrógeno*

Asociado al desarrollo de las tecnologías de hidrógeno, la producción de este gas podría hacerse más económica si los electrolizadores y equipo de gestión de hidrógeno disminuyen de precio. Considerando esto, se plantea una reducción del costo de hidrógeno para cada escenario de penetración (Tabla 2-1):

- **Business as Usual:** plantea una reducción del costo de hidrógeno de acuerdo a las tendencias del mercado actuales
- **Hydrogen Breakthrough:** plantea una disminución ligeramente más optimista que el escenario *BAU*, considerando que se acelera el desarrollo de electrolizadores más baratos y con mayor eficiencia.
- **Battery Breakthrough:** en este escenario se plantea la posibilidad de que un aumento en la demanda de soluciones a baterías frene el desarrollo de las tecnologías de hidrógeno y que estas reduzcan sus costos menos que en las trayectorias pronosticadas en 2020.

*Tabla 2-1 Evolución del LCOH utilizado en cada escenario de penetración*

LCOH (USD/kg H <sub>2</sub> )		2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
H35	BAU	7.60	6.89	6.13	3.71	3.51	3.38	3.29	3.27	3.23
	HB	7.60	6.44	5.93	3.49	3.32	3.19	3.11	3.09	3.05
	BB	7.60	6.81	6.39	4.05	3.82	3.66	3.56	3.53	3.48
H70	BAU	8.78	7.77	7.01	4.61	4.59	4.41	4.30	4.26	4.20
	HB	8.78	7.27	6.76	4.34	4.15	4.05	3.95	3.92	3.87
	BB	8.78	8.08	7.35	5.12	5.07	4.88	4.76	4.70	4.63

El costo nivelado de hidrógeno solamente afecta a los FCEV y aumenta o reduce su competitividad frente a los BEV e ICEV.

Tanto la evolución de CAPEX de los BEV y FCEV, como el Costo Nivelado de Hidrógeno fueron introducidos dentro del modelo de CTP para identificar los momentos de penetración de los 5 segmentos de vehículos estudiados en cada escenario de penetración.

Dentro de cada escenario se discutirán los resultados de la penetración de tres tipos de vehículos representativos; buses, vehículos ligeros comerciales y vehículos de carga pesada, sin embargo se pueden encontrar los resultados para el resto de segmentos en el [Anexo 2](#).

## 2.2. Escenario Business as Usual

En este escenario la penetración ocurre de acuerdo con las tendencias actuales del mercado, mismas bajo las que se han generado los resultados del CTP discutidos en la sección 1 de este reporte.

En el segmento de carga pesada, la competitividad técnica y económica de los FCEV hacen que estos tengan una penetración alta. Si la oferta de mercado de los BEV estuviese lista pronto, estos podrían tener preferencia en el mercado hasta 2034 pero posterior a ese año, sus ventas desacelerarían significativamente y los FCEV comenzarían a ganar terreno. Las unidades BEV existentes en 2050 serían las vendidas hasta inicios de la década de 2040. (figura 2-2).



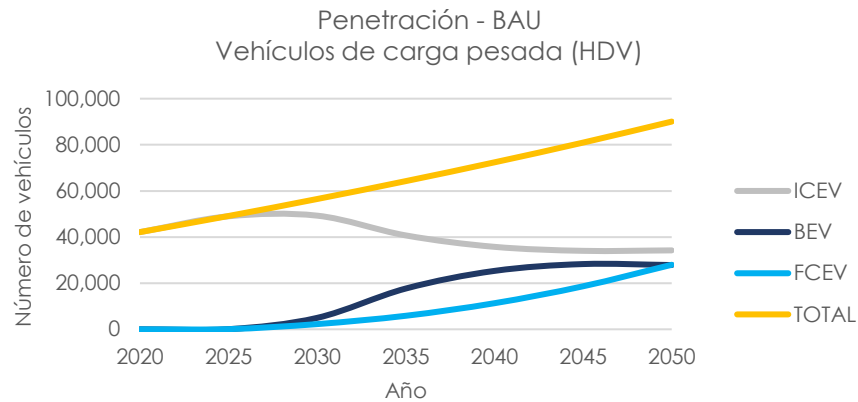


Figura 2-2 Proyección de penetración BAU de vehículos de carga pesada

La penetración de buses eléctricos corresponde a la meta del Plan de Descarbonización: 100% de la flota en 2050 y la segmentación BEV y FCEV corresponde al volumen identificado de flotas con rutas inter urbanas en Costa Rica: aproximadamente 30% (figura 2-3).

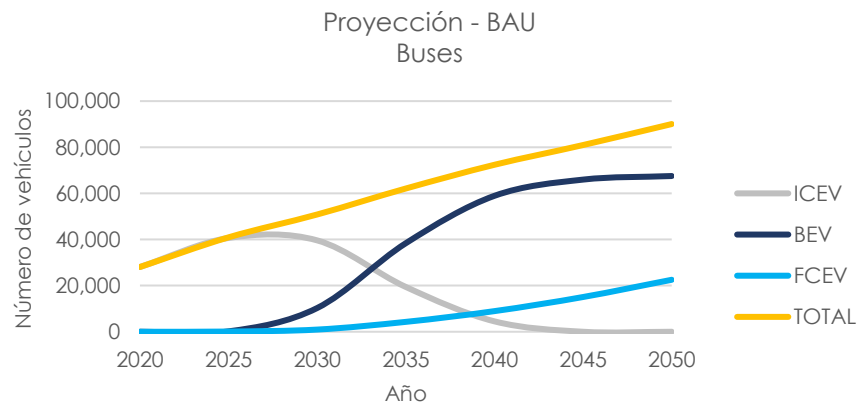


Figura 2-3 Proyección de penetración BAU de buses

Por su parte, los vehículos ligeros comerciales reservan una proporción de aproximadamente 12% de la flota del segmento para los FCEV, un número que es aparentemente bajo pero que representa más de 50 mil unidades en 2050, lo cual está relacionado con el aumento en el uso de los servicios de transporte público, incluidos los que ofrecen a través de aplicaciones móviles. (figura 2-4)

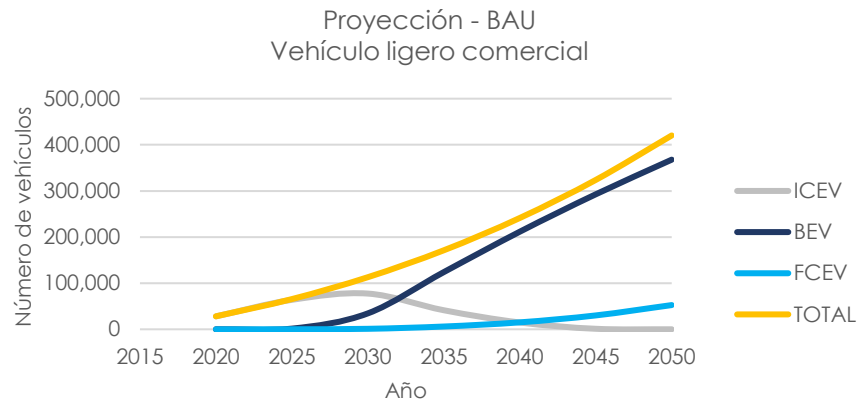


Figura 2-4 Proyección de penetración BAU de vehículos ligeros comerciales

### 2.3. Escenario Hydrogen Breakthrough

En el escenario Hydrogen Breakthrough los vehículos más competitivos siguen siendo los de carga pesada. De acuerdo con el cruce temprano de su CTP con el de los ICEV (2025), hacia 2050 su participación de la flota podría ser superior a la de BEV e ICEV.

En este escenario que los FCEV tienen una competitividad económica tan temprana, si la infraestructura de recarga de hidrógeno tuviera un despliegue adecuado, en 2050 se podría superar la meta de descarbonización, teniendo hasta un 60% de vehículos de carga pesada eléctricos. (figura 2-5)

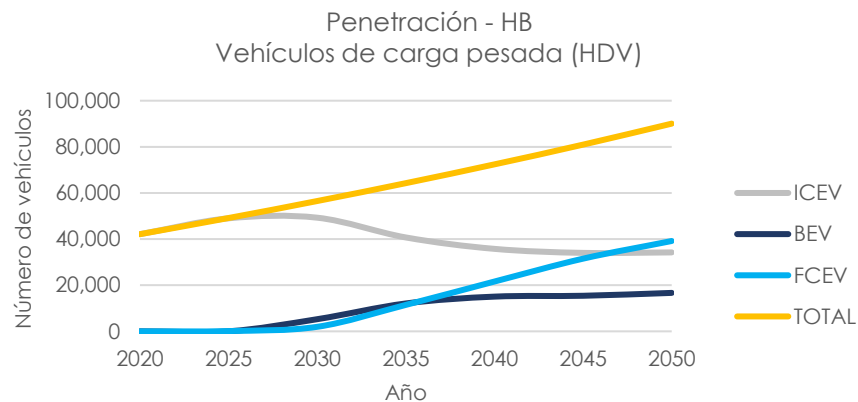


Figura 2-5 Proyección de penetración HB de vehículos de carga pesada

Los buses FCEV al ser competitivos con los ICEV en 2028 y con los BEV en 2033 en este escenario, tienen una alta penetración también rumbo a 2050. Son una tecnología que por su precio y características de desempeño son preferidos desde el 2033 en adelante.

En este escenario los buses BEV adquieren un volumen considerable de la flota desde el 2020 hasta el 2033, posteriormente ven frenadas sus ventas y hacia 2050 ya muchas de las unidades compradas en el pasado comienzan a salir de circulación.

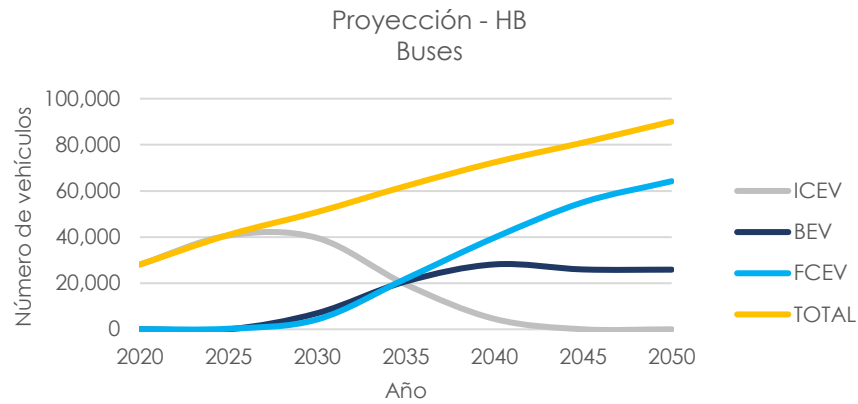


Figura 2-6 Proyección de penetración HB de buses

En este escenario los vehículos ligeros FCEV, aunque se vuelven competitivos más tarde que los buses o HDV, alcanzan equilibrio con los BEV entre 2035 y 2040 por lo que su penetración hacia 2050 sería media. En la figura 2-7 se observa que los FCEV ligeros comerciales podrían tener una ligera proporción extra sobre los BEV y que una proporción equilibrada podría ocurrir en el caso de los ligeros particulares.

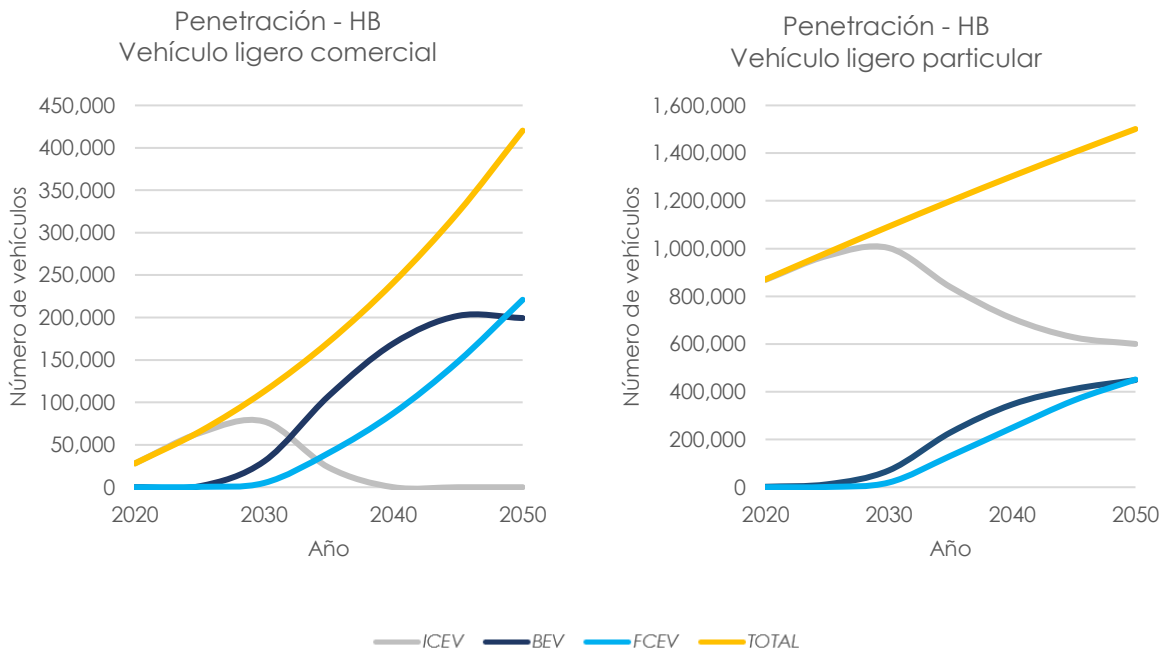


Figura 2-7 Proyección de penetración HB de vehículos ligeros

## 2.4. Escenario Battery Breakthrough

En el escenario Battery Breakthrough los vehículos predominantes son los eléctricos a batería, aunque en un ecosistema compartido con proporciones menores de FCEV.

En este escenario, vehículos de carga pesada, aunque tendrán más unidades BEV en la flota, mantendrán una proporción media de FCEV por sus características de autonomía y mayor capacidad de carga de mercancías (figura 2-8).

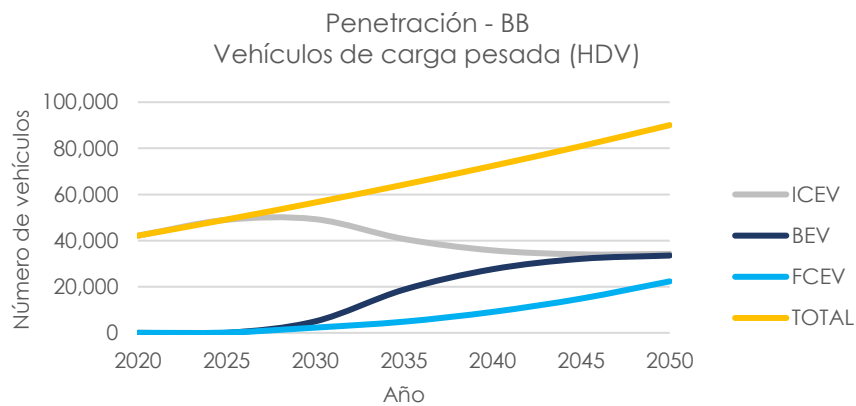


Figura 2-8 Proyección de penetración BB de vehículos de carga pesada

En el segmento de buses, ocurre algo similar al segmento de los HDV: la mayoría es para los BEV pero los FCEV conservan una proporción de la flota para aquellas rutas de larga distancia o de tránsito intensivo (figura 2-9).

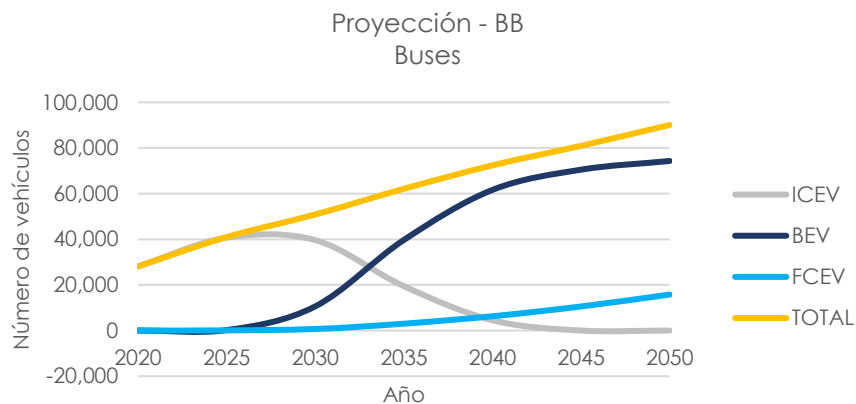


Figura 2-9 Proyección de penetración BB de buses

Los segmentos ligeros, particularmente los FCEV que tienen relleno de hidrógeno a 700 bar, se ven drásticamente afectados en su penetración a la flota. Aunque no se descarta su existencia para aplicaciones de uso intensivo como patrullas o taxis 24-7, su participación porcentual podría ser menor al 2%.

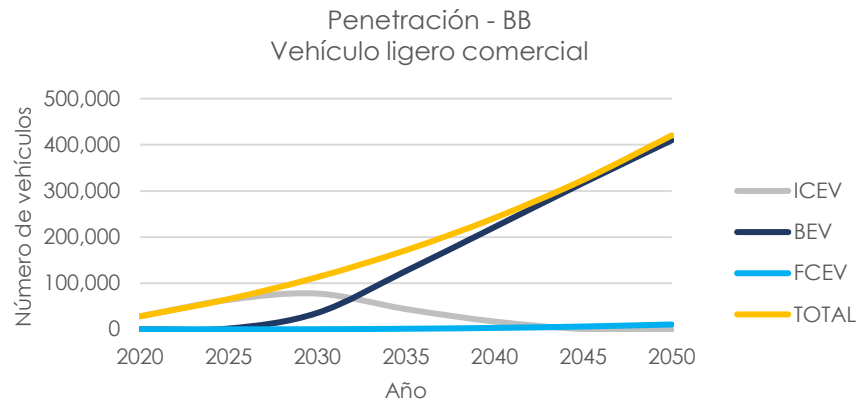


Figura 2-10 Proyección de penetración BB de vehículos ligeros comerciales

### 3. Evaluación de co-beneficios de un impulso a la sustitución tecnológica

#### 3.1. Evaluación de co-beneficios identificados bajo el escenario Business as Usual

La implementación de VEs conlleva numerosos impactos positivos tanto ambientales como sociales. Una forma de evaluar estos impactos es el uso de indicadores que cuantifican los co-beneficios asociados. La metodología de cálculo de estos indicadores se muestra en el [Anexo 3](#). Los resultados principales de esta cuantificación, elaborados para el escenario Business as Usual, se muestran a continuación:

##### 3.1.1. Reducción de emisiones de GEI

La matriz eléctrica de Costa Rica tiene un alto contenido de energías renovables, por lo que el factor de emisión de GEI asociado al consumo energético es bajo. De este modo, con la implementación de la movilidad eléctrica hay un potencial alto de reducción de emisiones de GEI.

La figura 3-1 muestra el factor de emisión de los BEV y FCEV calculado para 2030 y para 2050:

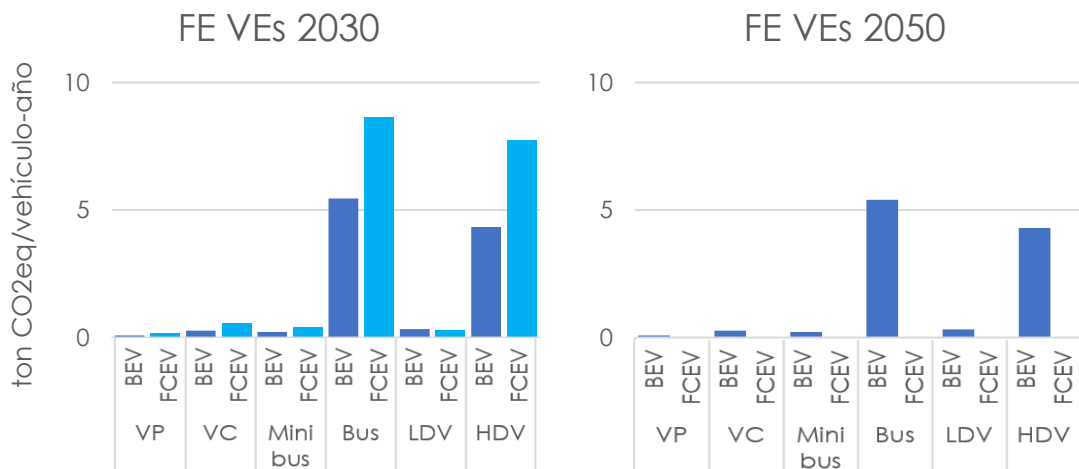


Figura 3-1 Factores de emisión de los vehículos eléctricos a 2030 y 2050

Se espera que a 2050, el consumo energético para la producción de hidrógeno sea 100% renovable (hidrógeno verde). Este hidrógeno permite el aumento del potencial de reducción de emisiones.

Por otro lado, a 2050 el consumo energético de los BEV sigue teniendo un porcentaje de emisiones de GEI, puesto que se proyecta que la matriz energética seguirá teniendo un porcentaje de generación térmica (ICE, 2019).

La figura 3-2 muestran el ahorro en emisiones según el total de vehículos eléctricos proyectados hasta 2050 y el porcentaje del ahorro respecto al total de emisiones de los vehículos convencionales en cada año evaluado.

### Ahorro en emisión de GEI

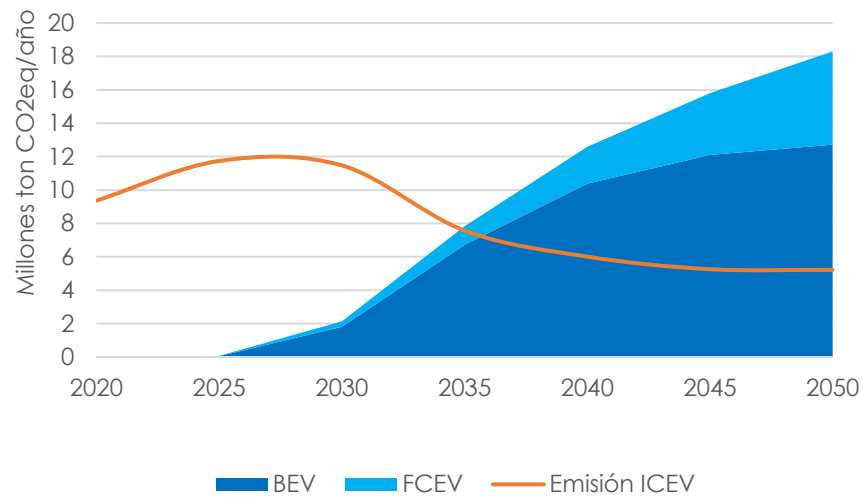


Figura 3-2 Ahorro en emisiones de GEI sector transporte

Para el año 2035, el ahorro en emisiones debido a la movilidad eléctrica es equivalente a las emisiones de GEI generadas por los ICEV. Según la proyección de la flota vehicular, al año 2050 se tendría una reducción total de **18.3 millones de toneladas de CO2eq** y emisiones por ICEV de **5.2 millones de toneladas de CO2eq**. Así, el ahorro en emisiones en 2050 es 3.5 veces lo que se proyecta que emitan los vehículos convencionales.

Por otro lado, el Plan Nacional de Descarbonización indica que, bajo un escenario base, se espera que el sector de energía (que incluye generación eléctrica, transporte y manufactura y construcción y otros) emita 9.5 millones de toneladas de CO2eq. Adicionalmente, según el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (2014), el sector transporte constituyó el 66% de las emisiones del sector de energía, por lo que se infiere que a 2050 se proyecta una emisión total de **6.3 millones de toneladas de CO2eq** por ICEV.

En comparación, las emisiones calculadas para 2050 son un poco menores a las reportadas en el Plan Nacional de Descarbonización. Esta diferencia puede ser debida a los métodos de cuantificación y a las proyecciones de vehículos convencionales.

#### 3.1.2. Reducción de emisión de contaminantes

La implementación de VEs conlleva grandes ventajas en cuanto a la reducción de contaminantes. Los principales contaminantes que se dejan de emitir son:

- **PM 2.5 y PM 10:** Material particulado respirable. El origen del PM 2.5 es principalmente antropogénico, mientras que el PM 10 puede provenir de fuentes naturales como partículas de polvo procedentes de intrusiones de viento. El material particulado está asociado a la exacerbación de enfermedades respiratorias.

- **CO:** Es un gas tóxico, inodoro e incoloro. Proviene principalmente de la combustión incompleta del carbono durante el proceso de combustión. A bajas concentraciones, el CO causa fatiga. Bajo una exposición prolongada puede afectar el sistema nervioso y cardiovascular.
- **NOx:** Grupo de gases compuesto por óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). Se forma como subproducto de combustión a alta temperatura. Es un gas tóxico e irritante. Una exposición prolongada puede afectar el sistema inmune y los pulmones. Su oxidación en el ambiente puede generar lluvia ácida.
- **COV:** Compuestos orgánicos volátiles. Al reaccionar con NOx generan ozono. La exposición al ozono puede producir irritación de ojos y vías respiratorias, alergias, disminución de la función pulmonar, entre otros. La exposición a largo plazo de COV puede causar lesiones del hígado, los riñones y el sistema nervioso central.
- **SO<sub>2</sub>:** Gas incoloro e irritante. Afecta principalmente a las mucosidades y los pulmones. La exposición crónica a este contaminante induce efectos adversos sobre la mortalidad, la morbilidad y la función pulmonar. Puede generar lluvia ácida por la formación de ácido sulfúrico.

La reducción en emisiones de los contaminantes descritos se cuantifica bajo la metodología detallada en el [Anexo 3](#).

Los vehículos eléctricos emiten material particulado debido al desgaste de llantas y frenos. No obstante, la emisión de material particulado es menor en comparación con un vehículo convencional a combustión, debido a que estos últimos emiten también por combustión de gasolina o diésel. A continuación, se muestra el ahorro en emisión de contaminantes por segmento para el año 2030 y 2050:

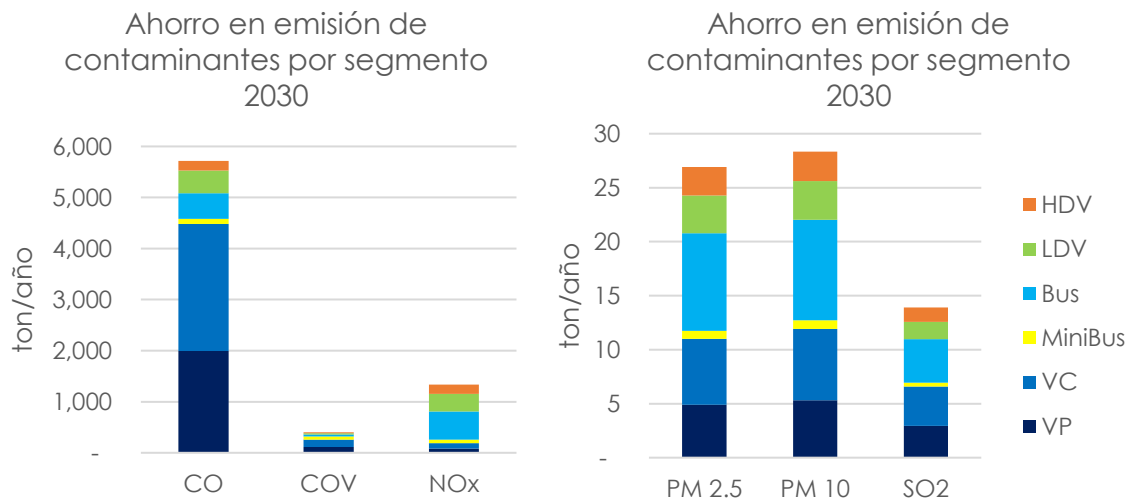


Figura 3-3 Ahorro en emisión de contaminantes por segmento 2030



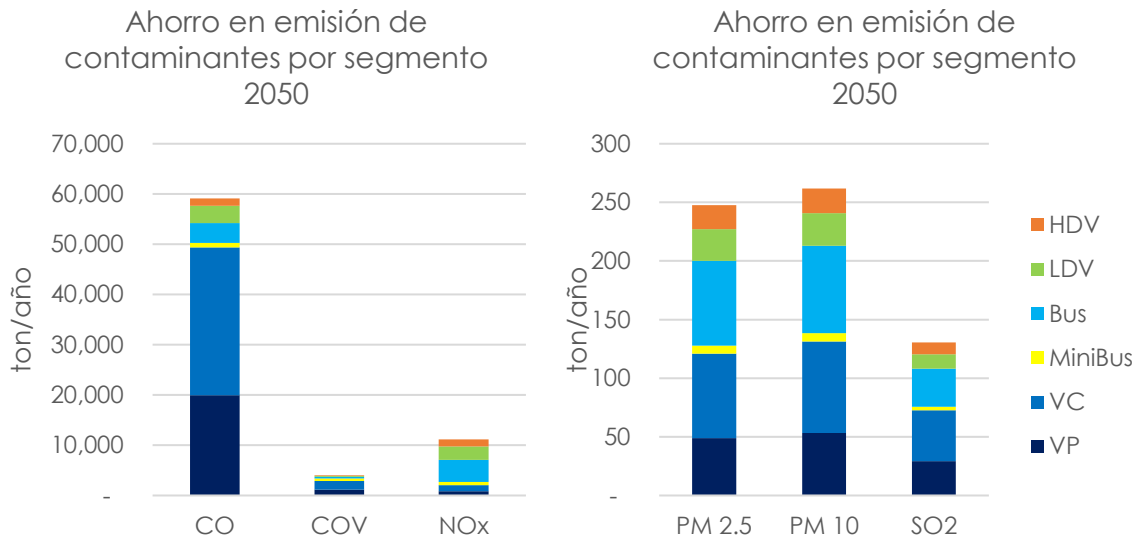


Figura 3-4 Ahorro en emisión de contaminantes por segmento 2050

Los resultados se analizan por tipo de contaminante:

- **PM 10 y PM 2.5:** El segmento que representa un mayor ahorro en emisiones de este contaminante es el de **buses** debido a que tiene el factor de emisión y kilometraje por año más alto entre los segmentos estudiados. Es importante notar que la mayor parte de emisión de estos contaminantes proviene de los vehículos a diésel.
- **CO, COV:** El segmento que representa un mayor ahorro en emisiones de estos contaminantes es el de **vehículos de pasajeros (particular y comercial)** debido a que el factor de emisión asociado a la combustión de gasolina es mayor que el del diésel.
- **NOx, SO2:** El segmento que representa un mayor ahorro en emisiones de estos contaminantes es el de **buses y HDV** debido al factor de emisión y kilometraje por año más alto entre los segmentos estudiados. Además, el factor de emisión de NOx asociado a la combustión de diésel es significativamente mayor al de combustión de gasolina.

Las figuras 3-5 y 3-6 muestran el ahorro en emisiones según el total de vehículos eléctricos proyectados hasta 2050 y el porcentaje del ahorro respecto al total de emisiones de los vehículos convencionales en cada año evaluado.

### Ahorro y Emisión de Contaminantes

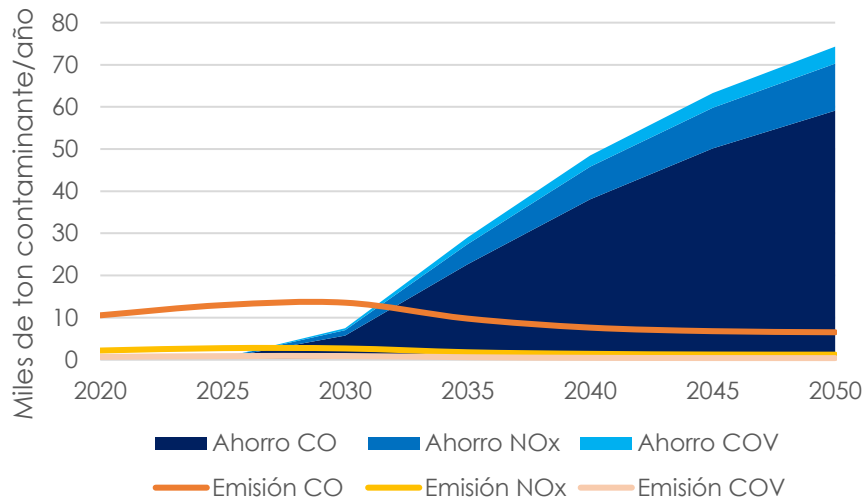


Figura 3-5 Ahorro en emisiones de contaminantes sector transporte (CO, NOx,COV)

### Ahorro y Emisión de Contaminantes

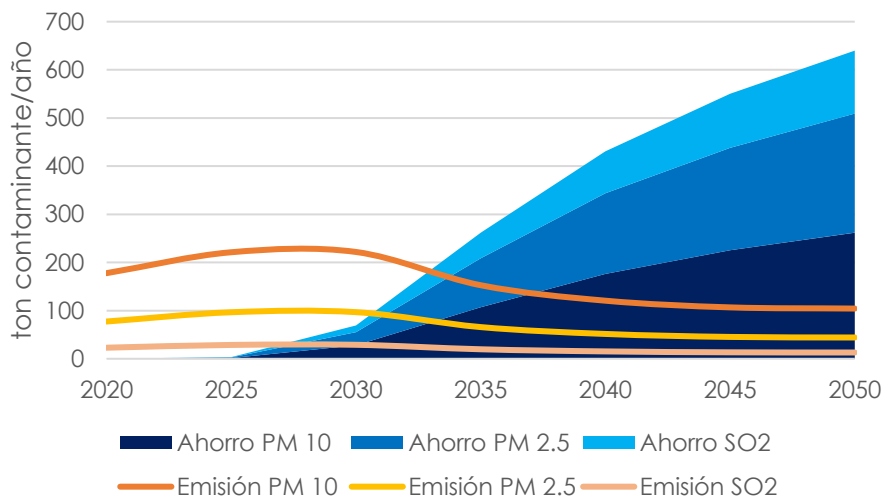


Figura 3-6 Ahorro en emisiones de contaminantes sector transporte (PM10, PM2.5, SO2)

El ahorro de contaminantes por la implementación de los EV es igual o mayor al total de las emisiones de los ICEV desde el año 2031 de acuerdo con la proyección realizada. En el caso de las emisiones de material particulado, se alcanza un ahorro equivalente al 100% de lo que emiten los ICEV desde alrededor del año 2037.

Adicionalmente, es relevante notar que los VEs permiten reducir la emisión de ruido en comparación con un vehículo convencional. La cuantificación de este impacto se

hace, por lo general, con mapas de ruido, donde se determinan mediciones de decibeles en puntos clave.

La diferencia en emisión de ruido puede ser de hasta 20dB en comparación con un vehículo de combustión interna (Sandberg, et al., 2010). Esta diferencia es menor a medida que la velocidad del vehículo aumenta, ya que la fuente de principal de ruido pasa de ser del motor a la fricción de las llanas contra el asfalto.

### 3.1.3. Ahorro en consumo de combustibles fósiles

La figura 3-7 muestra el ahorro en combustible fósil según el total de vehículos eléctricos proyectados a 2030 y 2050 y el ahorro económico correspondiente tomando el precio promedio de los combustibles en las estaciones de servicio de 2017 a 2020 reportados por RECOPE (Gasolina regular 607 colón/Litro, Diésel 519 colón/Litro).

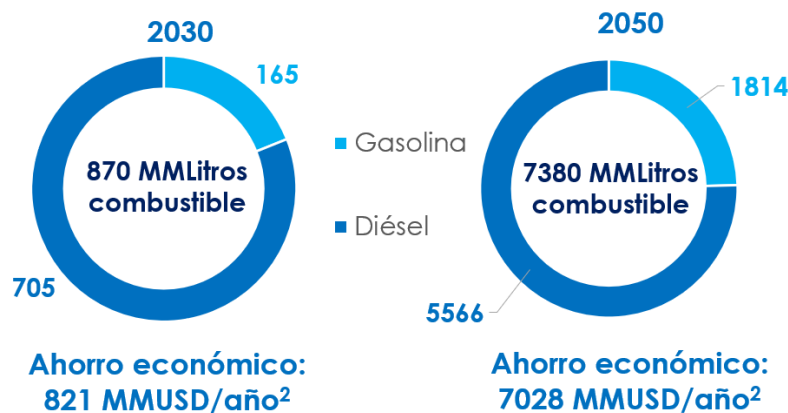


Figura 3-7 Ahorro en consumo de combustible para el total de la flota de VEs

Este ahorro en combustible podría amortiguar la volatilidad de precios de los combustibles y disminuir la dependencia energética por la importación de energéticos a Costa Rica para suplir la demanda del sector transporte.

### 3.1.4. Beneficios sociales

Los beneficios sociales incluyen la generación de empleo y la mejora de la salud pública debido a la reducción de la emisión de contaminantes.

Por un lado, la generación de empleos se puede cuantificar a partir de premisas específicas y de acuerdo con la proyección del parque automotor. Los supuestos de esa estimación se pueden encontrar en el [Anexo 3](#). Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3-1 Empleos nuevos estimados de la movilidad eléctrica

Empleos		2030	2050
Vehículo de pasajeros particular	BEV	940	2122
	FCEV	31	315
Vehículo de pasajeros comercial	BEV	452	1382
	FCEV	10	288
Minibus	BEV	71	64
	FCEV	3	34
Bus	BEV	149	84
	FCEV	37	344
LDV	BEV	340	503
	FCEV	50	554
HDV	BEV	71	26
	FCEV	105	428
<b>TOTAL</b>		<b>2259</b>	<b>6144</b>

Así, se estima que se generarían aproximadamente 2,259 empleos nuevos a 2030 y 6,144 a 2050. Esta estimación incluye las etapas de mantenimiento de los vehículos y la construcción, operación y mantenimiento de la infraestructura requerida (estaciones de carga y HRS).

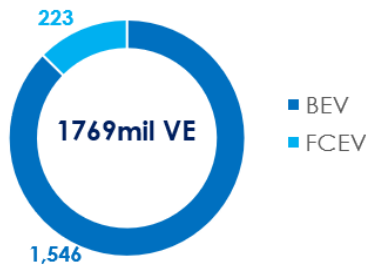
Por otro lado, la cuantificación del impacto sobre la salud pública requiere el manejo de información nacional desde las áreas de salud, pero también desde las áreas que velan por la calidad del aire de Costa Rica. Para esto, se recomienda establecer a nivel nacional un método definido que permita determinar el impacto en salud producto de la variación de emisiones de algún contaminante criterio. La metodología debe ser local ya que existen condiciones climáticas y geográficas que determinan patrones de ventilación y por lo tanto de concentración, por lo que no es directo extrapolar valores extraídos de otras metodologías desarrolladas en otros países.

La mejora en la salud pública implica un ahorro económico sobre costos de salud y de productividad perdida por enfermedad y muerte.

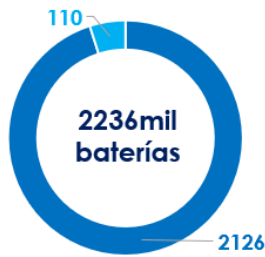
### 3.1.5. Número de baterías que llegan al final de su vida útil

Si bien las baterías de los vehículos eléctricos pueden tener una segunda vida en usos estacionarios, después de esta segunda vida, estas baterías tendrán una disposición como residuo al llegar al final de su vida útil. Esta se cuantifica tanto para BEV como para FCEV:

**Flota EV (2050)**  
Miles de vehículos



**Acumulado de baterías al final de su vida útil (2050)**  
Miles de baterías



**Acumulado de baterías al final de su vida útil (2050)**  
GWh

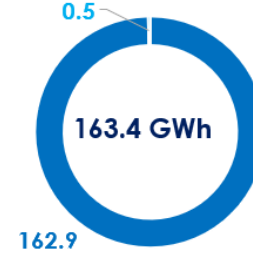


Figura 3-8 Flota de VE en 2050 y acumulado de baterías que llegan al final de su vida útil

Teniendo en cuenta el tamaño de las baterías, el 99.7% de éstas provienen de los BEV aunque estos conformen un porcentaje menor en la flota eléctrica (87%). Esto es debido a que la batería de un BEV debe ser cambiada al menos una vez durante la vida útil del vehículo (con excepción de los vehículos ligeros particulares debido al bajo kilometraje anual). En comparación, los FCEV usan baterías más pequeñas, y por lo general ésta dura toda la vida útil del vehículo, generando un número menor de baterías.

La cantidad de baterías que llegan al final de su vida útil varía según el escenario evaluado. La siguiente figura muestra una comparación entre escenarios:

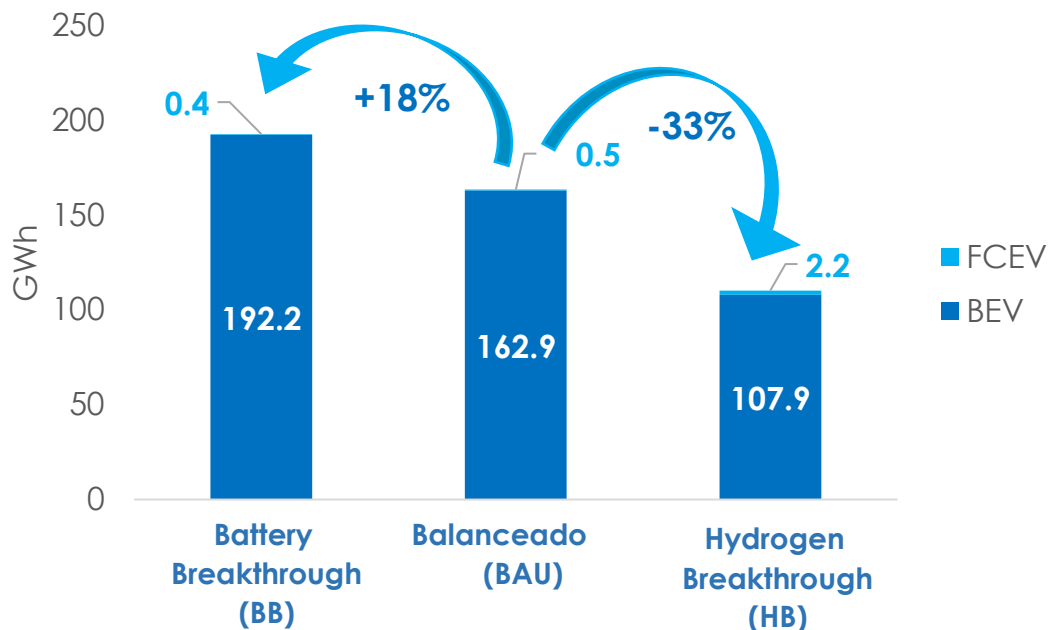


Figura 3-9 Baterías desechadas en Costa Rica al final de su vida útil a 2050 bajo los tres escenarios

De acuerdo con la Figura 3-9, el total de baterías usadas se reduciría considerablemente bajo el escenario de Hydrogen Breakthrough, mientras que bajo el escenario de Battery Breakthrough las baterías aumentarían.

No es claro si en Costa Rica las baterías de gran capacidad o de vehículos eléctricos han sido declaradas residuos de manejo especial o residuos peligrosos, pero su designación como tal por parte del Ministerio de Salud implicaría por medio de la Ley 8839 la toma de medidas especiales por parte de las municipalidades y del productor o importador para garantizar su correcta disposición final.

Por último, las celdas de combustible no se analizan dentro del estudio ya que no se consideran desechos especiales. Esto, puesto que las celdas de combustible tipo PEM no producen sustancias tóxicas o peligrosas cuando son desechadas. No obstante, se recomienda contemplar programas de recuperación de materiales al final de la vida útil de las celdas de combustible para minimizar el impacto ambiental de explotación de recursos. Típicamente se puede reciclar hasta un 95% de los metales preciosos en las celdas y la mayoría de los demás componentes son reciclados usando procesos convencionales (Ballard, 2017).

## 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

**El cálculo de CTP en prospectiva tiene asociado un rango de incertidumbre** para cada parámetro costado en el futuro. Cambios en las condiciones del mercado, oferta tecnológica, eventos políticos o sociales, como los que se han vivido durante 2020 ante la pandemia global por COVID-19 pueden impactar severamente las variables contenidas en el CTP tales como los precios de combustibles, de vehículos o incluso las condiciones de importación-exportación de vehículos entre países.

Debido a características como el reabastecimiento rápido (similar a los ICEV), la alta densidad de energía (peso menor que los BEV), **los FCEV son una solución extremadamente atractiva para vehículos pesados y comerciales.**

El segmento de **carga pesada** se prevé que esté fuertemente dominado por la tecnología de celda de combustible (FCEV) en los años a venir. Esto se debe principalmente a que:

- Generalmente este tipo de vehículos recorren largas distancias (más de 300km/día), por lo que las autonomías de los vehículos a batería no serían suficientes.
- Existe una gran incertidumbre frente a la disponibilidad comercial de camiones BEV en el corto-mediano plazo (ver sección 1.3.).
- La carga total efectiva a transportar en los camiones de carga a baterías disminuiría considerablemente (-33%) frente a la de un camión convencional a diésel (ver sección 1.3.).

Para los **buses**, se espera que exista una combinación entre tecnologías de batería y de celdas de combustible, que estará determinada principalmente las distancias a recorrer, así:

- Trayectos largos (>250km/día) y operación intensiva: Se espera que dominen los buses FCEV. Aproximadamente el 30% de los buses en Costa Rica son interurbanos. Varias de esas rutas, así como los buses urbanos de uso intensivo, no se podrían cubrir con BEV debido a una autonomía insuficiente (ver sección 1.3.)
- Trayectos cortos (<250km/día) y operación no intensiva: Se espera que dominen los buses a baterías (BEV) debido a su mayor competitividad económica.

La **carga ligera** (< 4 ton) en Costa Rica se espera que tenga una combinación entre tecnologías de batería y de celdas de combustible, las cuales presentarían CTPs muy similares de aquí a 2050. La decisión de compra estará determinada principalmente por los tamaños de flota y sus intensidades de uso, así:

- Flotas de hasta ≈20 camiones: los FCEV serían más competitivos

- Flotas de más de  $\approx$  20 camiones, en recorridos cortos (<160 km/día) y operación baja en intensidad: los BEV obtendrían acceso a tarifas de media tensión por lo que podrían resultar más competitivos

Los **minibuses** y **segmentos ligeros** (automóviles particulares y de uso como taxi y uber) en Costa Rica se prevé que esté fuertemente dominados por la tecnología de baterías (BEV) en los años venir. Esto se debe principalmente a dos factores:

- Los precios de adquisición de los FCEV son significativamente más altos que los BEV en estos segmentos
- Se prevé un costo de energético también mayor, ya que, para llevar un tanque más pequeño a bordo, estos vehículos cargan hidrógeno a alta presión (700 bar), el cual es más costoso que el hidrógeno a 350 bar que usan los vehículos pesados.

Los beneficios fiscales de la Ley 9518 favorecen los segmentos de la movilidad donde los precios de los vehículos son más bajos, es decir, los segmentos ligeros. Para los automóviles en uso particular o como taxi, el beneficio total por esta ley puede ser de hasta 22% del CTP. Sin embargo, en los vehículos de precios altos tales como los buses, a pesar de que el beneficio es mayor en términos absolutos, apenas logra representar un 5% del CTP. Teniendo en cuenta que el Plan de Descarbonización de Costa Rica tiene como uno de sus objetivos, lograr que la población costarricense disminuya el uso de vehículos particulares y use más el transporte público, resultaría adecuado reestructurar el esquema actual de incentivos.

**EL consumo de hidrógeno es el segundo componente que más contribuye al CTP de los FCEV después del precio de los vehículos.** una diferencia menor al 10% en el costo del hidrógeno en 2050 tendría un impacto de entre 15 y 20% en el CTP. Por lo anterior, cuidar aspectos como el costo de energía para producción de hidrógeno e impuestos a la importación y operación de equipos de producción y gestión de este gas (electrolizadores, compresores, tanques, etc.) serán de gran importancia para facilitar la penetración de los FCEV en Costa Rica.

En el escenario de penetración de vehículos eléctricos Business-as-Usual desarrollado en este informe, se esperaría que aproximadamente a partir del 2035 el consumo energético para la producción de hidrógeno fuera 100% renovable (hidrógeno verde). Esto implicaría que en ese año, las emisiones de GEI de los FCEV serían cero, mientras los BEV seguirían teniendo algunas emisiones asociadas, puesto que se espera que la matriz eléctrica de Costa Rica siga teniendo un porcentaje de generación térmica para ese entonces (ICE, 2019).

Para el año 2035, el ahorro en emisiones debido a la movilidad eléctrica sería equivalente a las emisiones de GEI generadas por los ICEV. Según la proyección de la flota vehicular, al año 2050 se tendría una reducción total **de 18.3 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>eq y emisiones por ICEV de 5.2 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>eq. Así,** el ahorro



en emisiones en 2050 sería 3.5 veces lo que se proyecta que emitan los vehículos convencionales.

El ahorro de contaminantes locales por la implementación de los EV sería igual o mayor al total de las emisiones de los ICEV desde el año 2031. En el caso de las emisiones de material particulado, se alcanzaría un ahorro equivalente al 100% de lo que emiten los ICEV desde alrededor del año 2037.

#### 4.2 Recomendaciones para mejorar la costo-efectividad de los vehículos eléctricos y promover su adopción acelerada

Considerando los análisis de CTP realizados para Costa Rica, nos permitimos a continuación identificar una serie de barreras detectadas, seguidas de una serie de recomendaciones para mejorar el desempeño económico de los vehículos eléctricos.

**Barrera.** *El esquema de incentivos de la Ley 9518 resulta, en general, más favorecedor para los BEV que para los FCEV.*

Los descuentos al IVA y al Impuesto Selectivo de Consumo en los vehículos eléctricos se otorgan por segmentos de precios, beneficiando hasta con 100% descuento a los vehículos más baratos y tasando porcentajes de descuento menores conforme los vehículos aumentan su valor. Debido a que los FCEV son generalmente más costosos, este régimen especial termina beneficiando en mayor medida a los BEV.

##### Recomendaciones:

- ➔ Eliminar el escalonamiento del esquema de incentivos, otorgando un mismo descuento según segmento vehicular, de manera que se obtenga un beneficio equivalente para BEV y FCEV en un mismo segmento.

**Barrera:** *El esquema de incentivos de la Ley 9518 prioriza el apoyo a la electrificación de los vehículos ligeros.*

El esquema de incentivos de la Ley 9518 prioriza el apoyo a la electrificación de los vehículos ligeros, ya que la contribución del apoyo resulta muy pequeña en proporción al CTP para los vehículos más costosos (como por ejemplo los buses de transporte público). Esto se debe al sistema escalonado (por intervalos de precio) que se usa para determinar la tasa a pagar. Esto contrasta con el Plan de Descarbonización de Costa Rica, cuyas metas señalan lograr que la población costarricense disminuya el uso de vehículos particulares y use más el transporte público.

##### Recomendaciones:

Priorizar la electrificación de los segmentos con las mayores emisiones totales (flotas de transporte público y segmentos pesados) mediante la reestructuración del sistema de incentivos actual o la migración a un sistema sin intervalos (descuentos porcentuales, por ejemplo).

**Barrera.** Costa Rica presenta altos costos de producción de hidrógeno – costos nivelados de hidrógeno (LCOH).

Los costos del hidrógeno, que representan hoy entre un 9% y un 32% del CTP para los diferentes segmentos, es aún muy costoso para permitir una competitividad con los vehículos a baterías en esta década, en la mayoría de los casos (excepto carga pesada)

#### Recomendaciones:

- ➔ Creación de incentivos específicos de carácter impositivo y arancelario o fondos no reembolsables para proyectos de electrólisis acoplados directamente a centrales hidroeléctricas, PCH, o plantas solares o eólicas, para reducir el LCOH proyectado
- ➔ Ofrecer temporalmente a los desarrolladores de proyectos de electrólisis tarifas eléctricas diferenciadas para proyectos conectados a red
- ➔ Exención de IVA y arancel para electrolizadores, celdas de combustible, y equipos de balance de planta involucrados en proyectos de producción, aprovechamiento, y distribución de hidrógeno verde

**Barrera.** Se requiere un despliegue de infraestructura de recarga o abastecimiento que acompañe la introducción de la movilidad eléctrica.

Si bien los segmentos donde se han priorizado los FCEV por mayor competitividad económica son segmentos pesados, donde generalmente se cuenta con estaciones dedicadas para flotas captivas, es importante que Costa Rica cuente con desarrollo temprano de producción y abastecimiento de hidrógeno que permita implantar la tecnología en el país.

Para los segmentos ligeros en los cuales se han priorizado los BEV por su mayor competitividad económica, es imperativo que exista una red de estaciones de carga rápida en el país bien instalada, para evitar la ansiedad de rango en los usuarios particulares y comerciales.

#### Recomendaciones:

- ➔ Fomentar la introducción de nuevos modelos de negocio y estructuras de financiamiento para el desarrollo de proyectos de infraestructura de abastecimiento.
- ➔ Desarrollar una hoja de ruta nacional para el despliegue de la infraestructura de abastecimiento de hidrógeno para FCEV y de recarga de energía eléctrica para BEV en el medio y largo plazo, para ofrecer certidumbre frente a la inversión privada en este tipo de estaciones.

**Barrera.** Los vehículos eléctricos a batería contribuyen en gran medida a la acumulación de residuos especiales (baterías que llegan al fin de su vida útil).

#### Recomendaciones:

Fomentar la introducción de nuevos modelos de negocio para el aprovechamiento comercial de la segunda vida de las baterías de vehículos eléctricos en los sistemas de generación distribuida instalados en hogares y comercios.

**Barrera.** *Una alta penetración de vehículos eléctricos a batería como la presentada en el escenario Battery Breakthrough, podría ocasionar impactos indeseables en las redes eléctricas.*

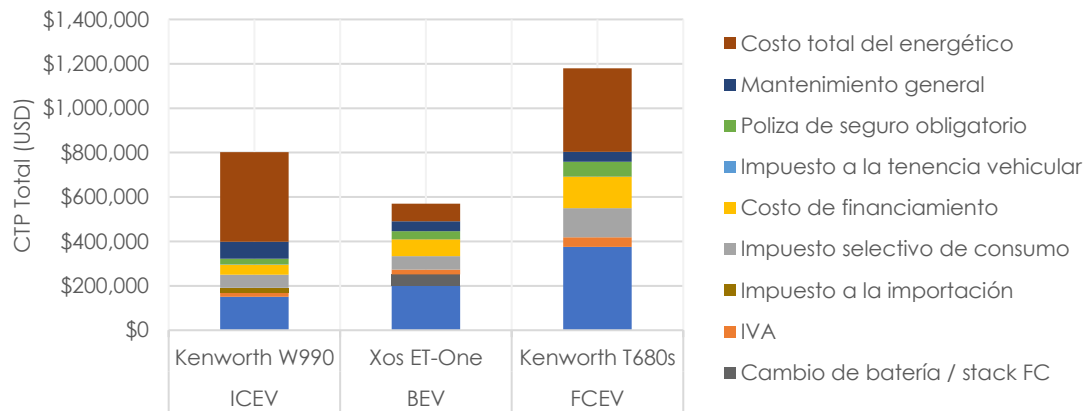
**Recomendaciones:**

- ➔ Estudiar de manera temprana los impactos que podría tener la recarga de BEV sobre las redes eléctricas en las principales ciudades y centros de consumo, teniendo en cuenta la penetración de vehículos calculada en el escenario Battery Breakthrough en este informe (caso que sería más problemático).
- ➔ Tomar en cuenta la potencial penetración masiva de BEV descrita en el escenario Battery Breakthrough en la planificación futura de las redes eléctricas.

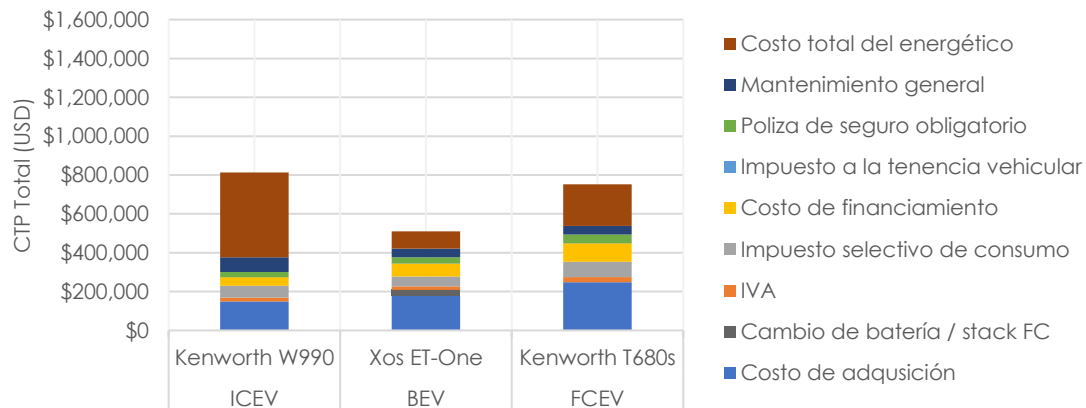
## Anexo 1 – Colección de gráficos del CTP

### Vehículos de carga pesada

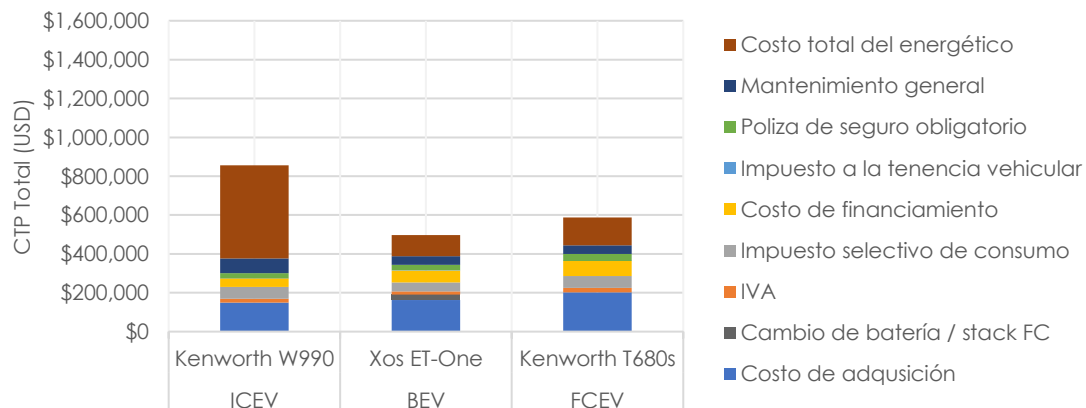
CTP 2020 - Vehículos de carga pesada (HDV) @44,500 km/año



CTP 2030 - Vehículos de carga pesada (HDV) @44,500 km/año

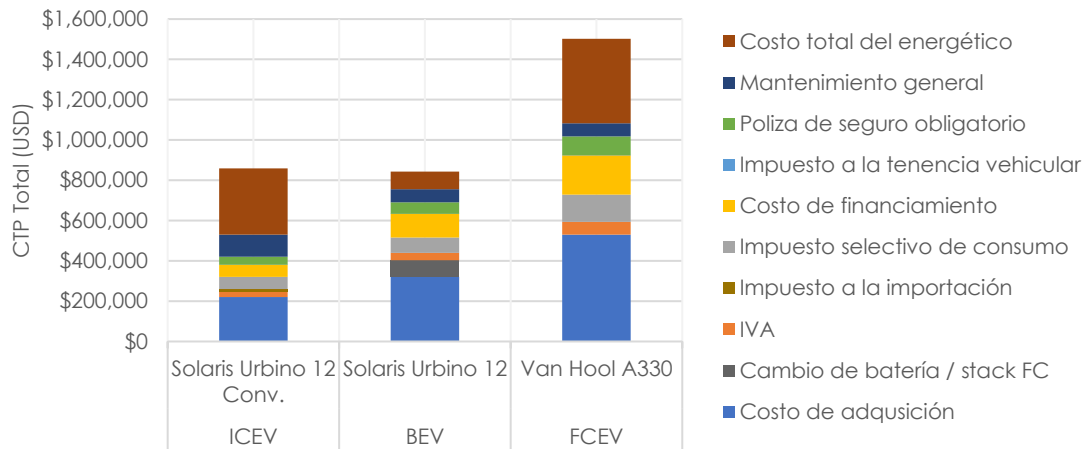


CTP 2050 - Vehículos de carga pesada (HDV) @44,500 km/año

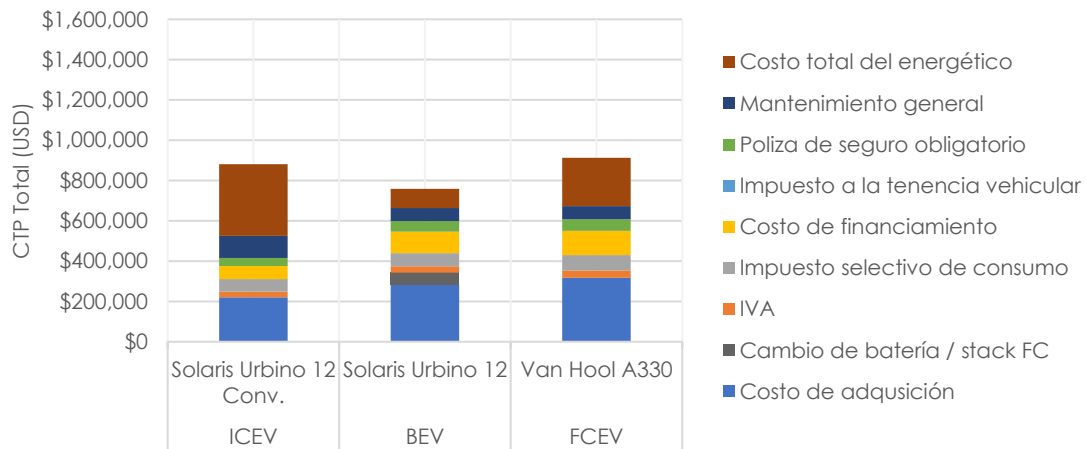


## Buses

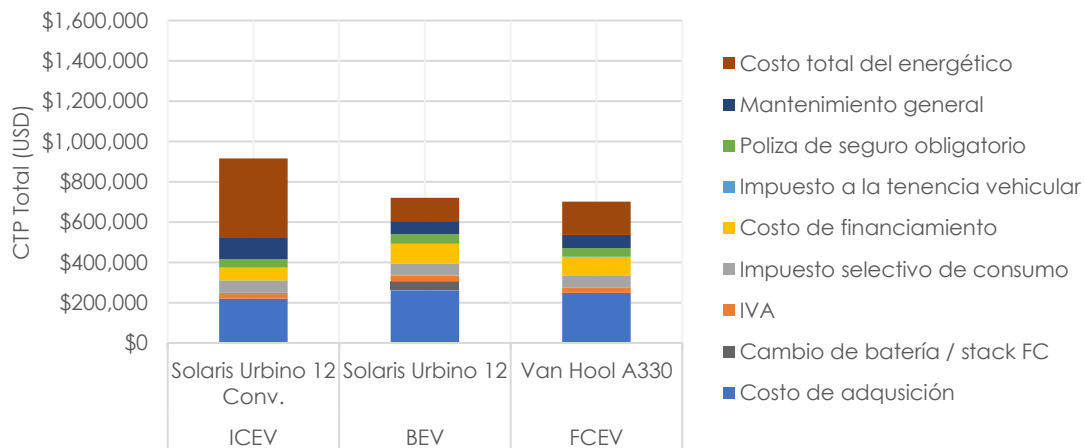
CTP 2020 - Buses @65,000 km/año



CTP 2030 - Buses @65,000 km/año

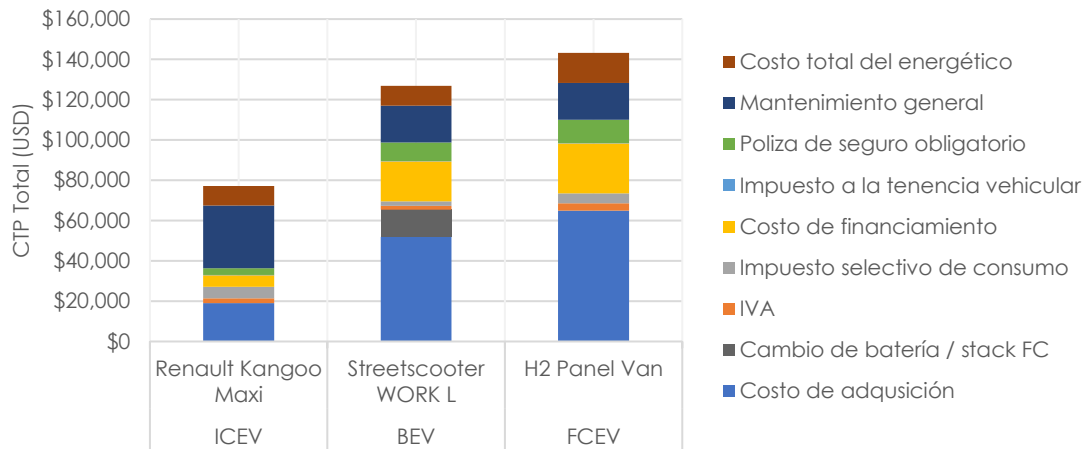


CTP 2050 - Buses @65,000 km/año

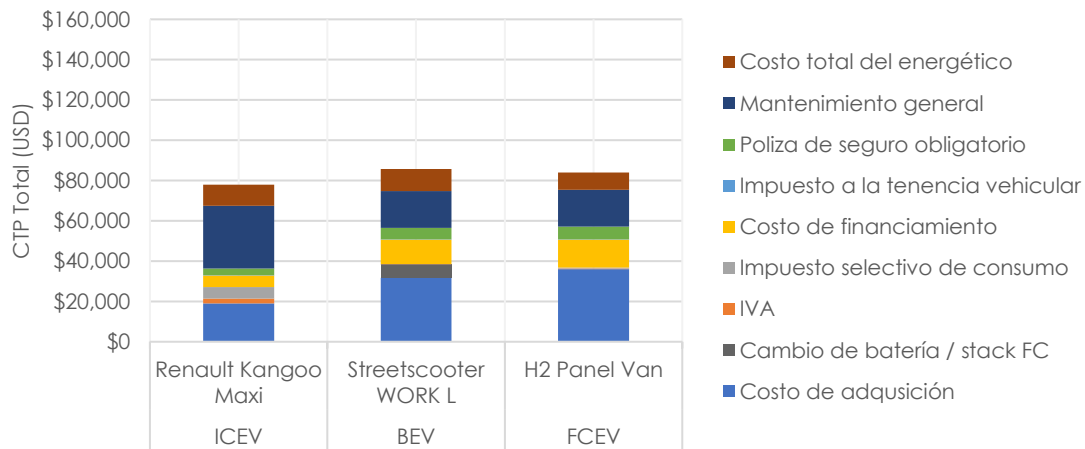


## Vehículos de carga ligera

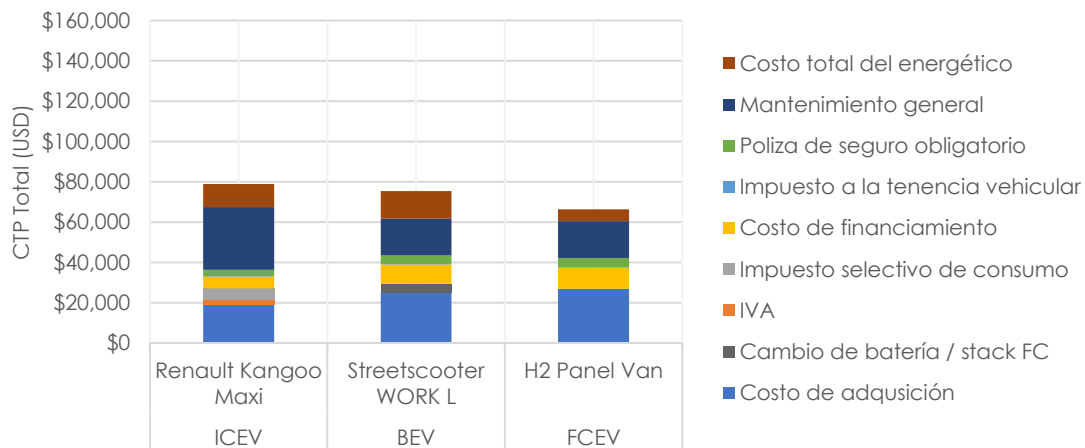
CTP 2020 - Vehículos de carga ligera (LDV) @18,300 km/año



CTP 2030 - Vehículos de carga ligera (LDV) @18,300 km/año

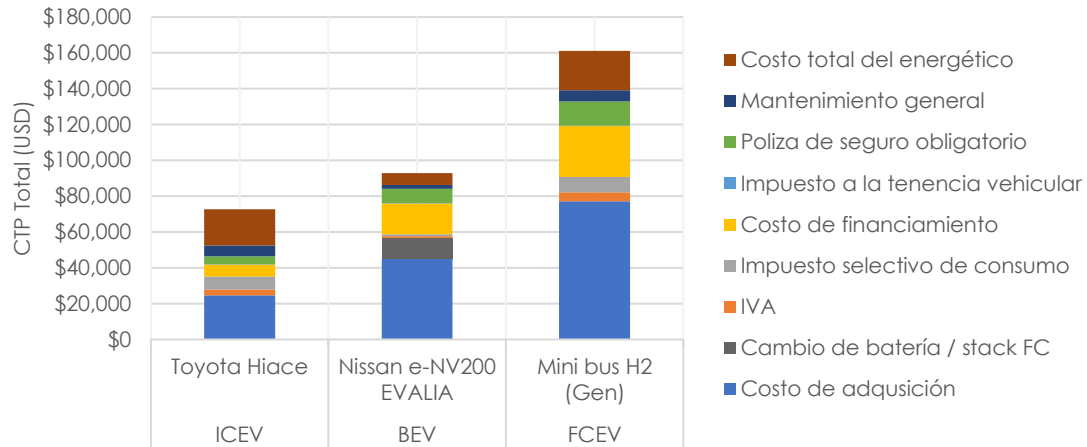


CTP 2050 - Vehículos de carga ligera (LDV) @18,300 km/año

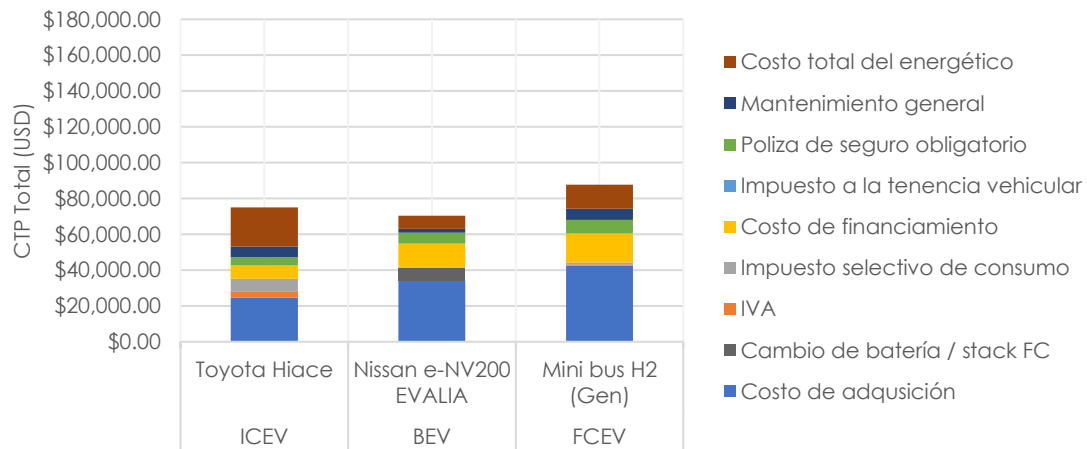


## Mini buses

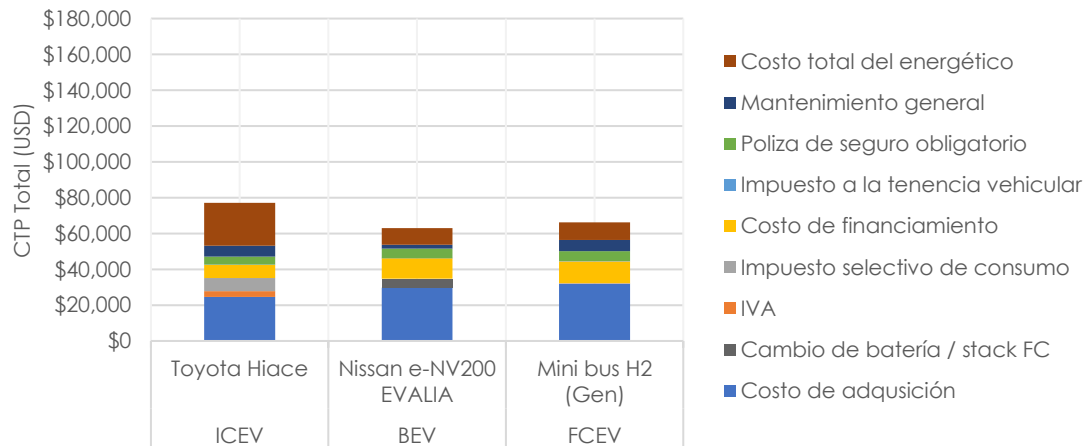
CTP 2020 - Mini buses @18,300 km/año



CTP 2030 - Mini buses @18,300 km/año

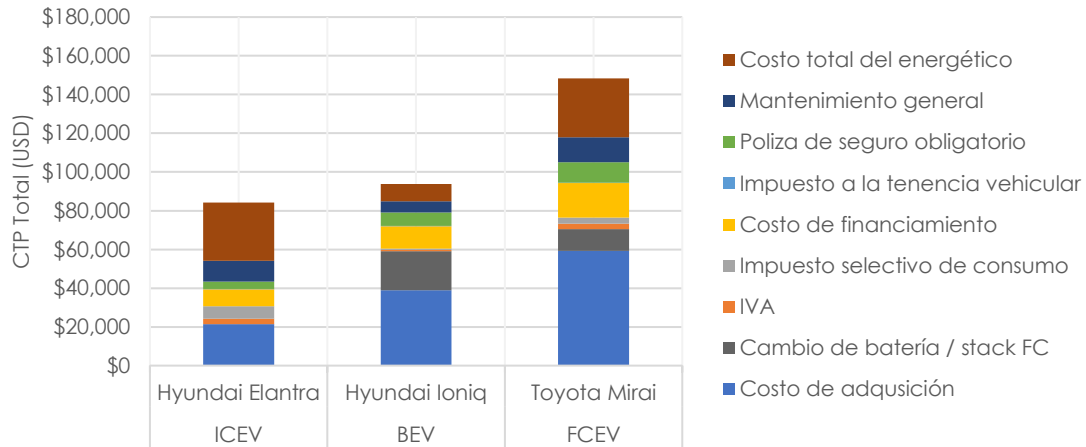


CTP 2050 - Mini buses @18,300 km/año

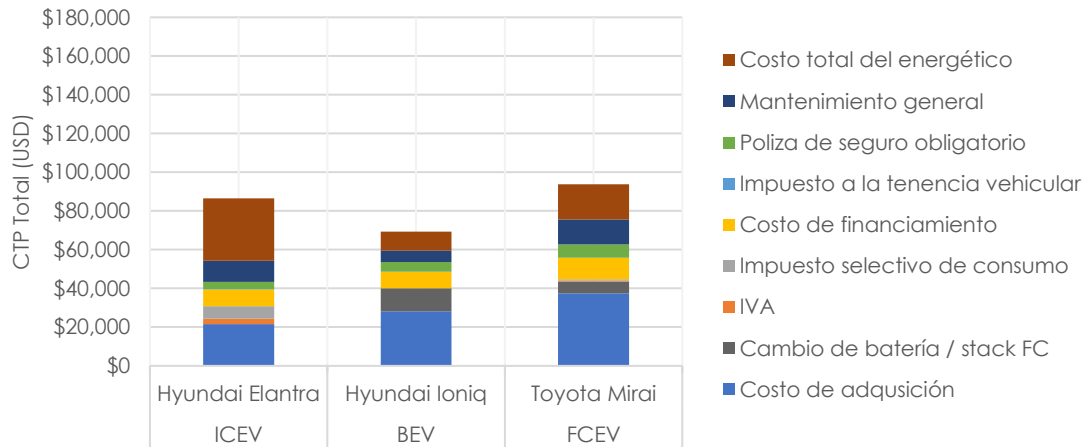


## Vehículos ligeros de uso comercial (taxi/uber)

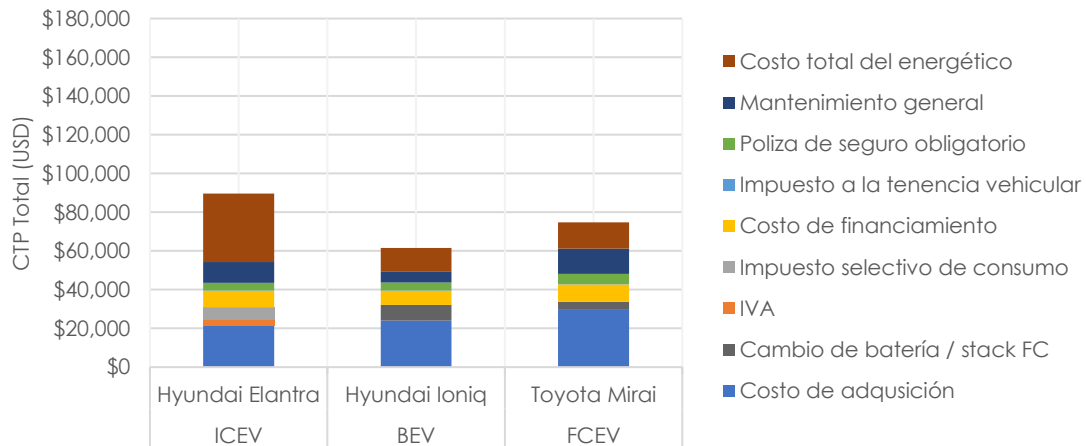
CTP 2020 - Vehículos ligeros comerciales @39,500 km/año



CTP 2030 - Vehículos ligeros comerciales @39,500 km/año



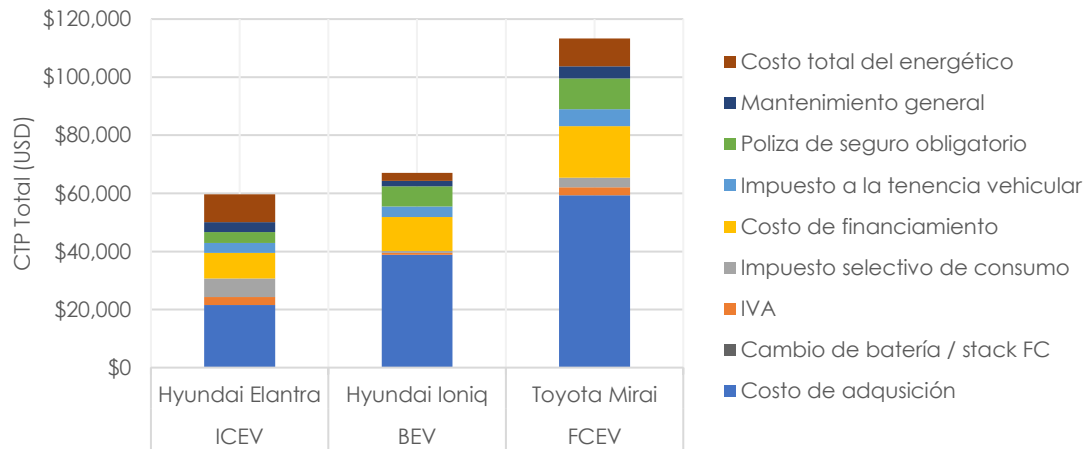
CTP 2050 - Vehículos ligeros comerciales @39,500 km/año



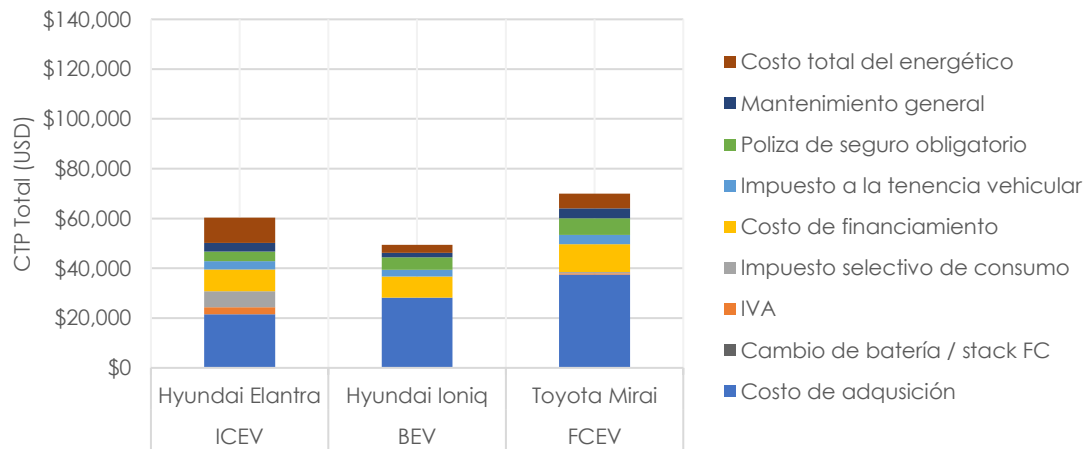


## Vehículos ligeros de uso particular

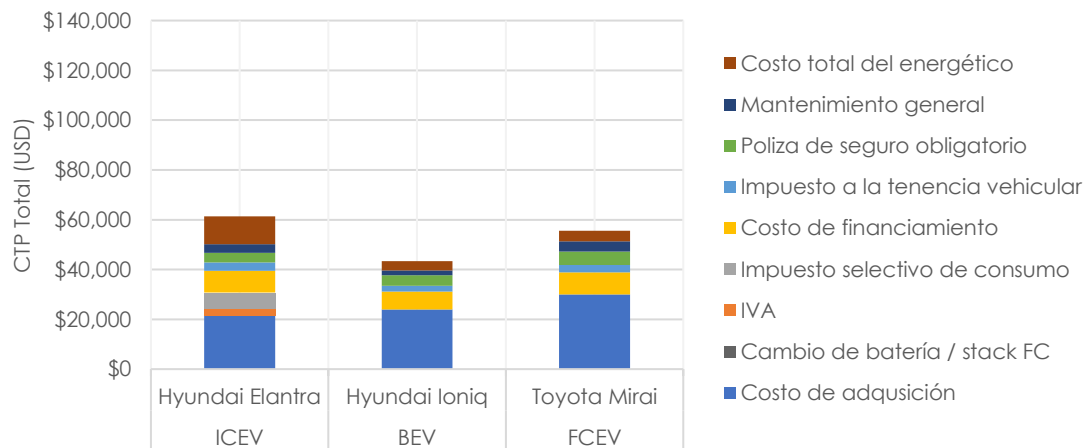
CTP 2020 - Vehículos ligeros de uso particular @12,500 km/año



CTP 2030 - Vehículos ligeros de uso particular @12,500 km/año

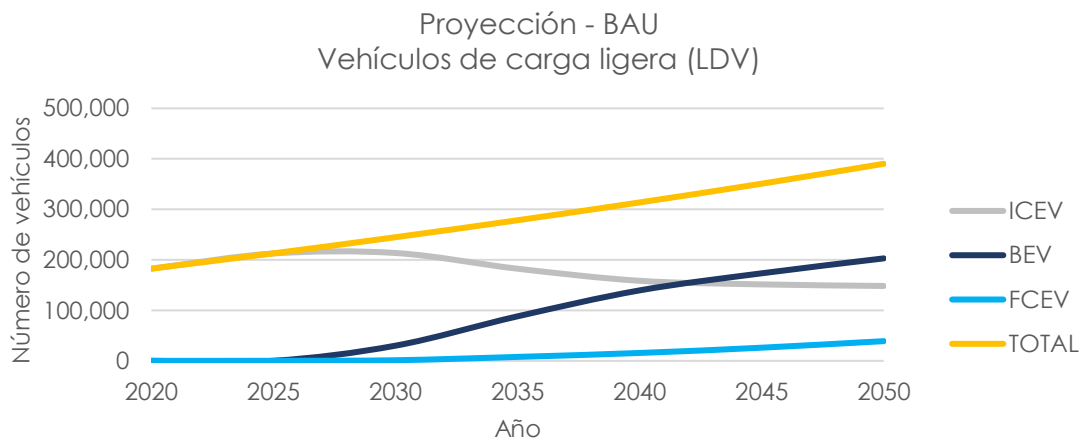
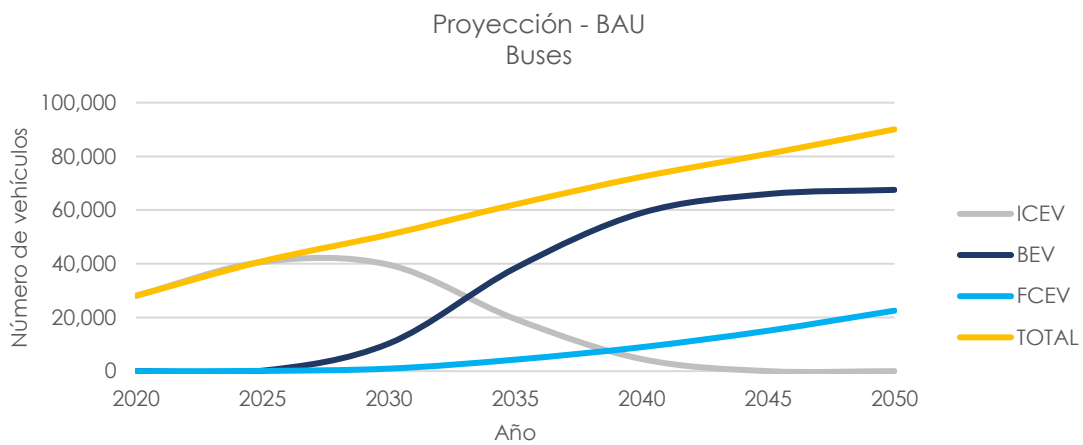
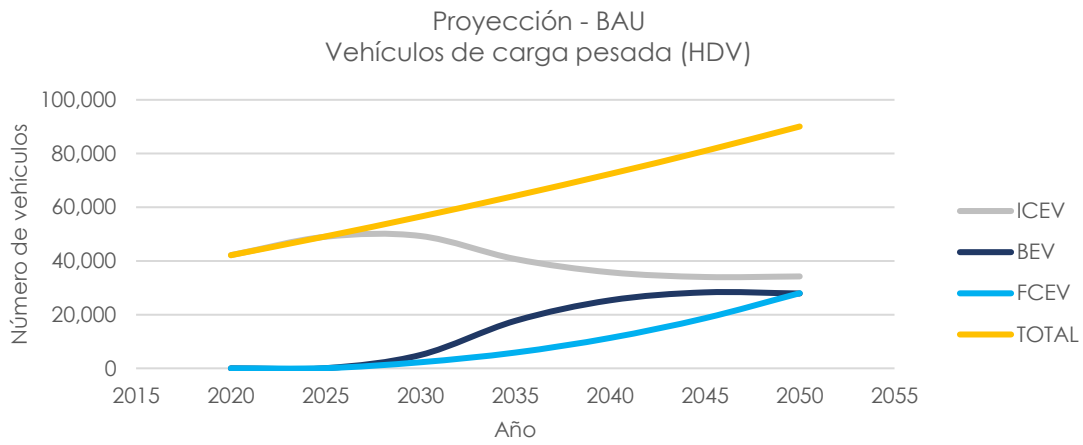


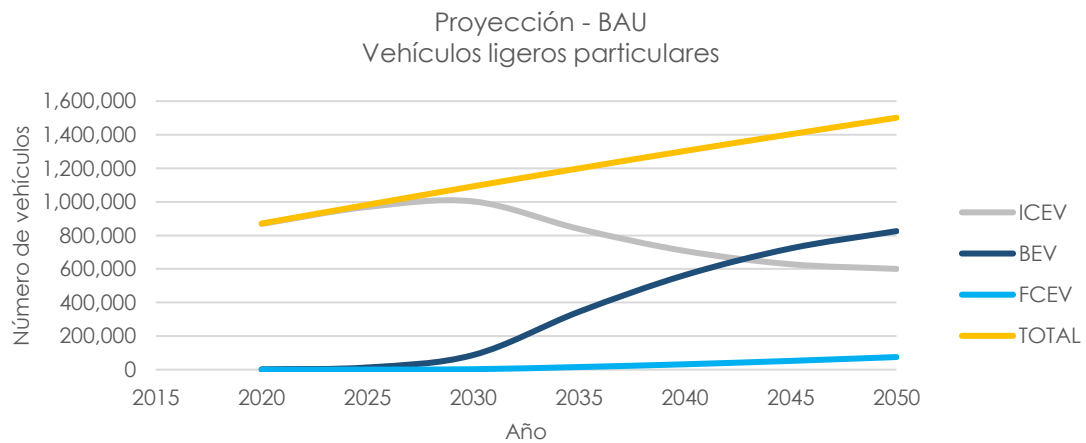
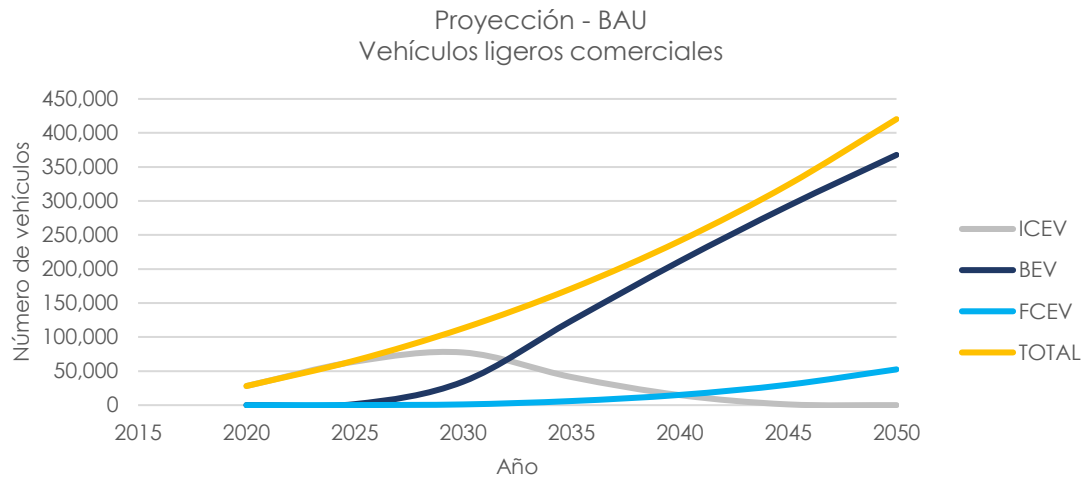
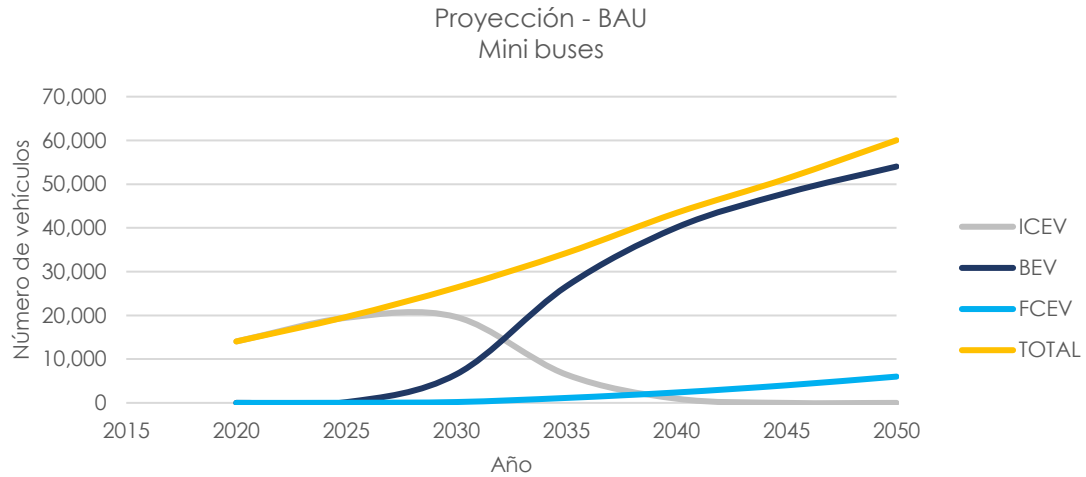
CTP 2050 - Vehículos ligeros de uso particular @12,500 km/año



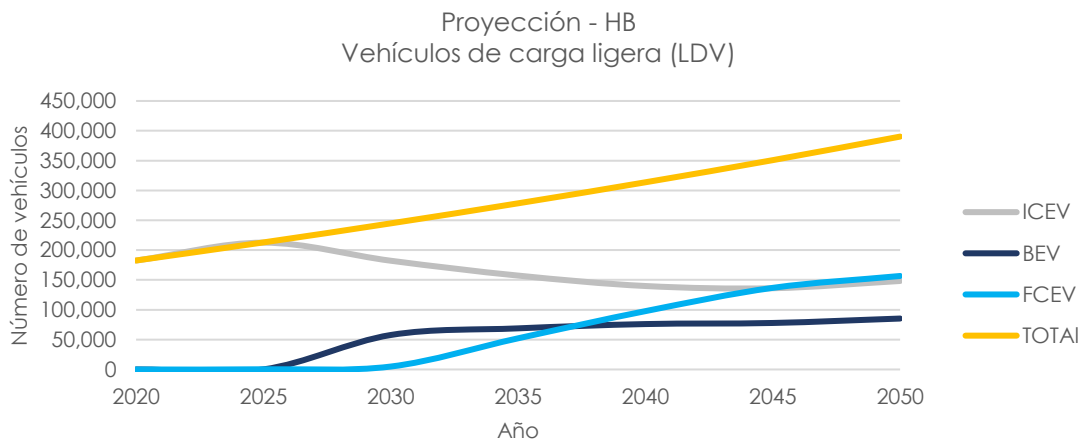
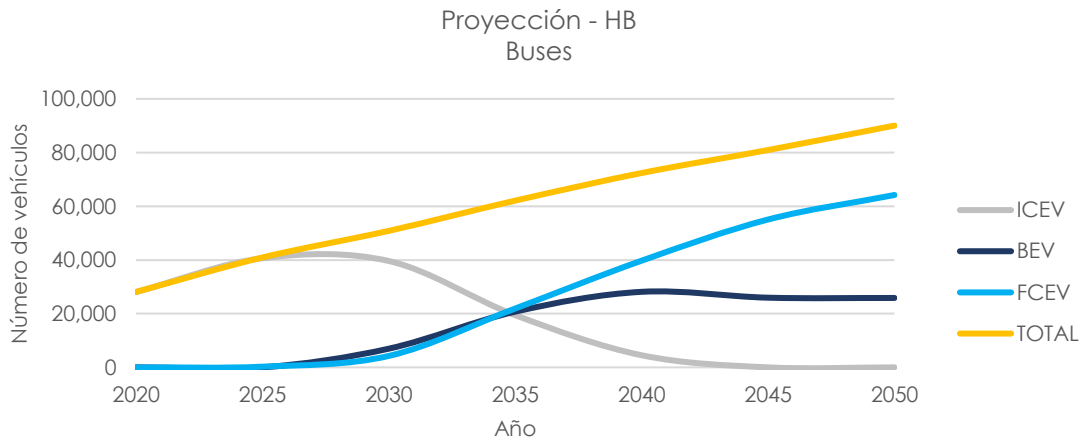
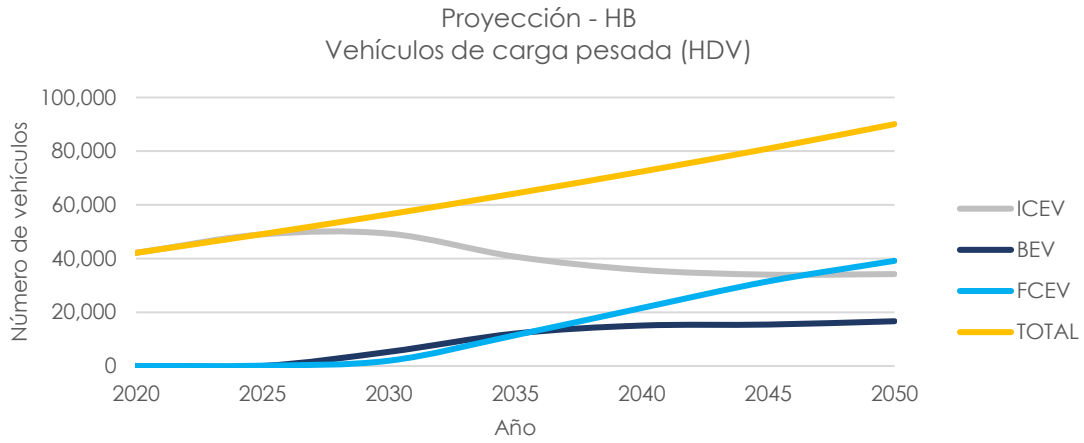
## Anexo 2 – Colección de gráficos de Escenarios de Penetración

### Escenario de penetración Business as Usual

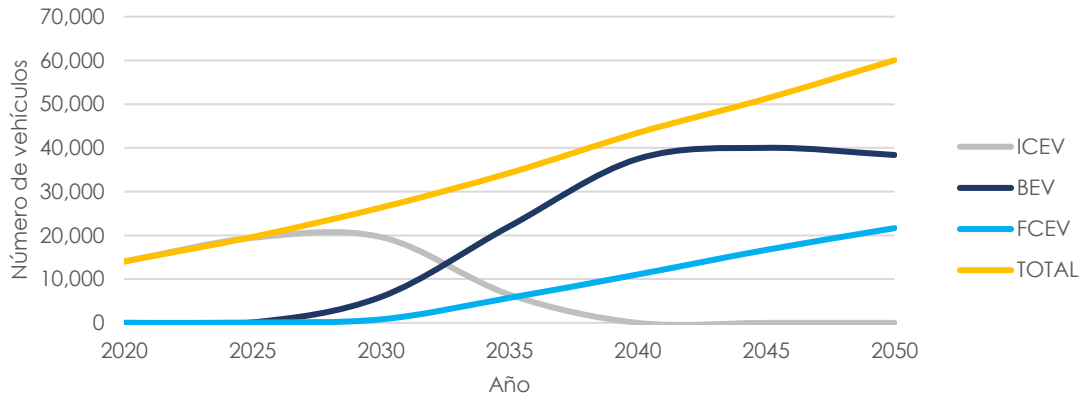




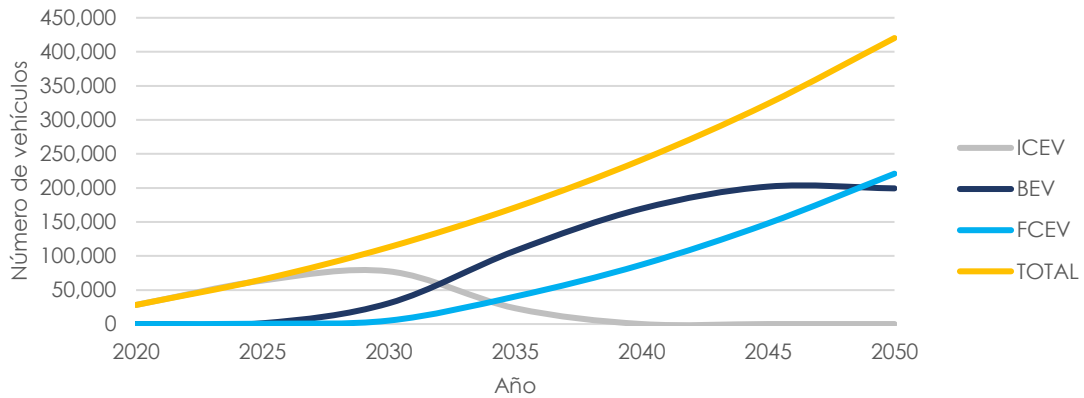
## Escenario de penetración Hydrogen Breakthrough



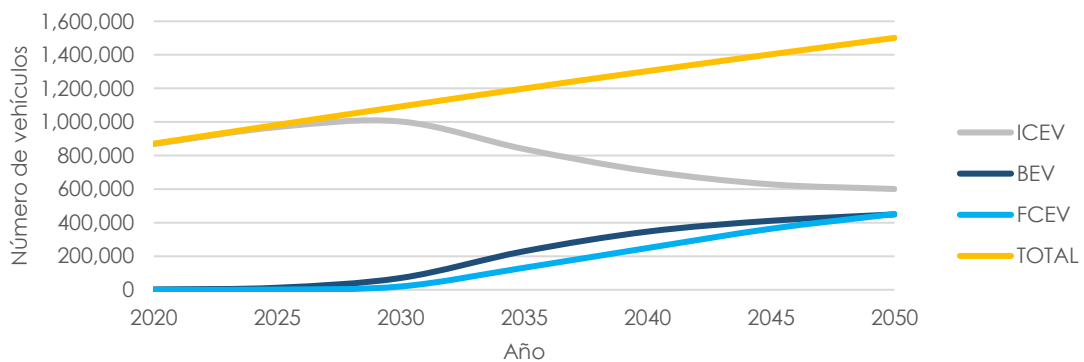
Proyección - HB  
Mini buses



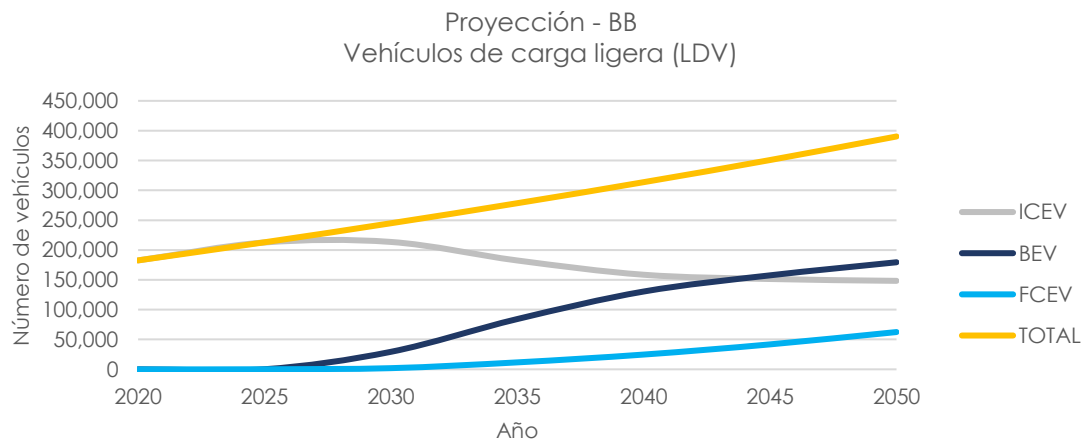
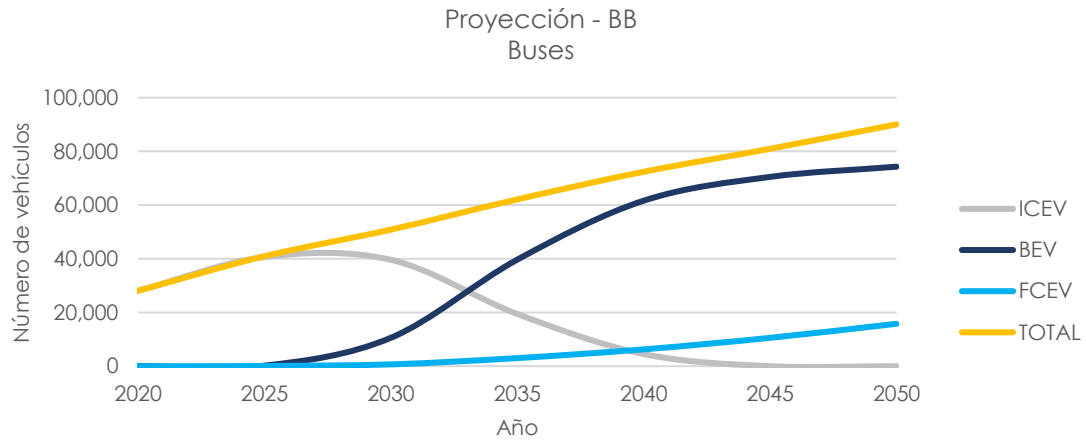
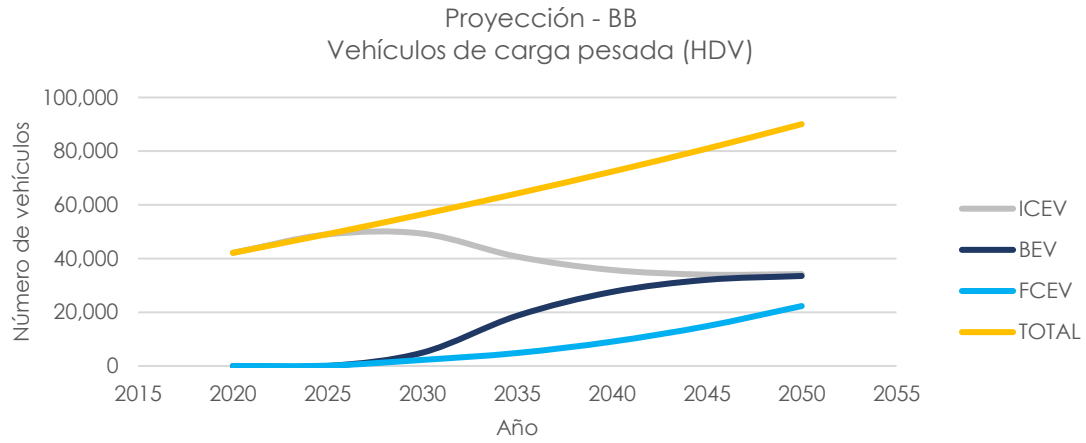
Proyección - HB  
Vehículos ligeros comerciales



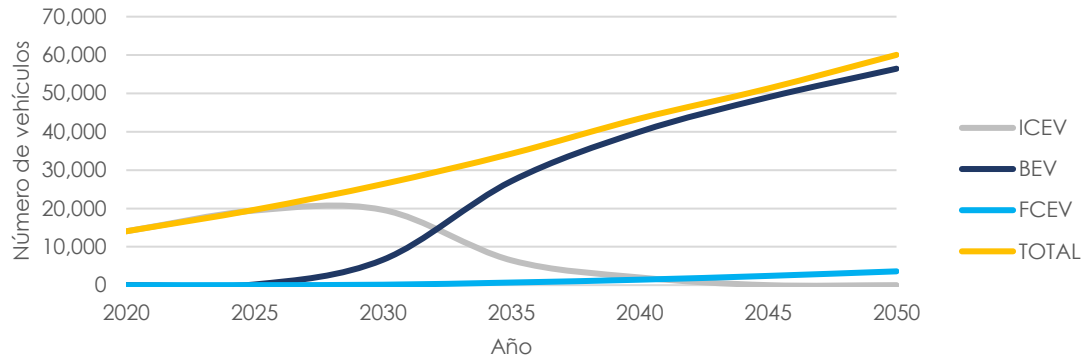
Proyección - HB  
Vehículos ligeros particulares



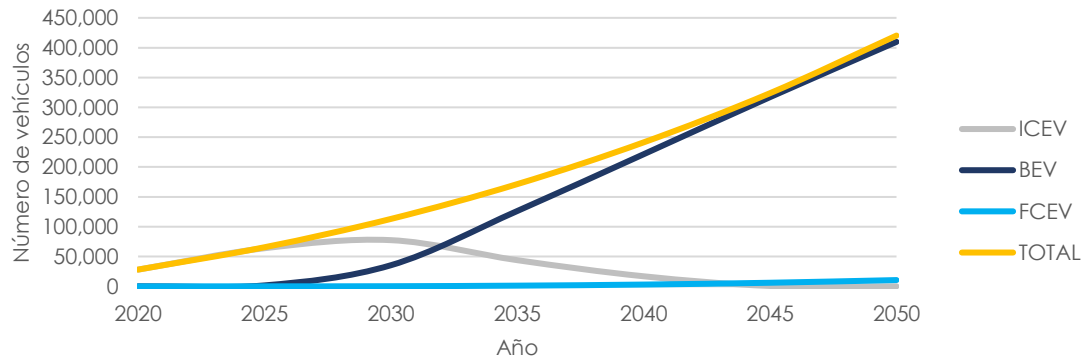
## Escenario de penetración Battery Breakthrough



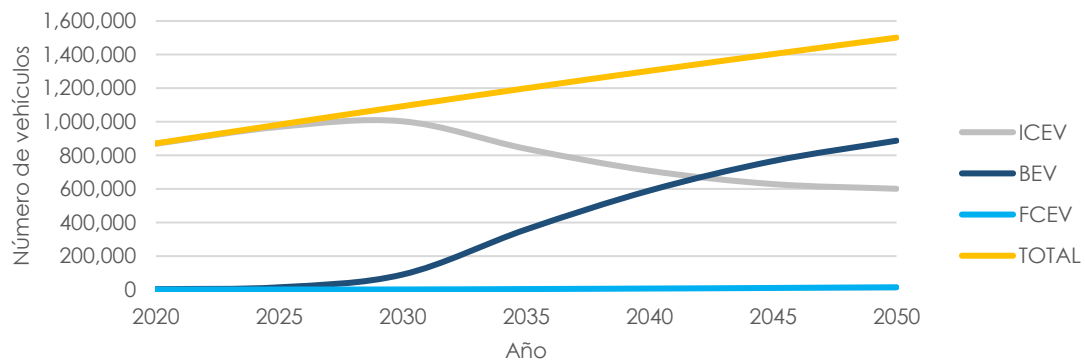
Proyección - BB  
Mini buses



Proyección - BB  
Vehículos ligeros comerciales



Proyección - BB  
Vehículos ligeros particulares



## Anexo 3- Metodología de cuantificación de co-beneficios

### Reducción de emisión de GEI

La reducción de emisiones de GEI se cuantifica a partir de los resultados de la proyección de las flotas vehiculares bajo el escenario Business as Usual y de los factores de emisión en Costa Rica asociados a cada tecnología. Se asume una metodología “pump-to-wheel” (emisiones producidas dentro del vehículo).

Para este cálculo, se toman los factores de emisión de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O por uso de combustibles fósiles (diésel y gasolina) publicados por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de Costa Rica. Para esto, se asume que los vehículos ICEV de pasajeros particulares y comerciales emplean gasolina para su funcionamiento, y el resto de los segmentos emplea diésel como fuente energética.

Para los vehículos eléctricos se tiene en cuenta:

- FCEV: Factor de emisión por la producción de Hidrógeno (CO<sub>2</sub>eq/kg H<sub>2</sub>). Este parámetro se calcula según la proyección de eficiencia del electrolizador y la fuente energética proyectada para la producción de H<sub>2</sub> (60% de la matriz hasta 2030 y 100% energía renovable de 2035 a 2050). El factor de emisión de la matriz eléctrica nacional se toma de (ICE, 2019a).
- BEV: Factor de emisión por consumo energético (CO<sub>2</sub>eq/kWh). Este parámetro se toma directamente del factor de emisión de la matriz eléctrica nacional (ICE, 2019a).

Tabla A3-1. Emisiones asociadas a los energéticos

Factor de emisión	Matriz (gCO <sub>2</sub> eq)	Hidrógeno (kg CO <sub>2</sub> eq/kg H <sub>2</sub> )
2020	33	1.1
2025	46	1.4
2030	47	1.4
2025	48	0.0
2040	48	0.0
2045	47	0.0
2050	47	0.0

Es importante mencionar que el factor de emisión asociado al consumo energético de un vehículo eléctrico no supera el 10% del factor de emisión de un vehículo convencional en Costa Rica. Esto principalmente debido a que la matriz eléctrica nacional tiene un componente fuerte de energía renovable.

El ahorro en emisiones se calcula para cada tecnología (BEV o FCEV) comparando las emisiones de la misma cantidad de VEs como si estos fueran ICEVs menos las emisiones



producidas por el consumo energético del VE. También, se calcula el ahorro porcentual de emisiones respecto a lo que emite la flota proyectada de ICEVs en el año evaluado.

### Reducción de emisión de contaminantes

La reducción de emisión de contaminantes se cuantifica a partir de los resultados de la proyección de las flotas vehiculares bajo el escenario Business as Usual y de los factores de emisión asociados a cada tecnología. Se emplea la metodología “pump-to-wheel”.

Los factores de emisión se toman de (GREET, 2013) según la información disponible para modelos 2020 de cada segmento evaluado. Para esto, se asume que los vehículos ICEV de pasajeros particulares y comerciales emplean gasolina para su funcionamiento, y el resto de los segmentos emplea diésel como fuente energética.

Todos los vehículos (ICEV, FCEV, BEV) emiten PM 2.5 y PM 10 asociado al desgaste de llantas y frenos. No obstante, los ICEV emiten una mayor cantidad de material particulado ya que hay una emisión adicional de PM 2.5 y PM 10 debido la quema de combustible. Además de la emisión de material particulado, los VEs no emiten otro tipo de contaminantes.

### Ahorro en consumo de combustibles fósiles

El ahorro en combustible se determina según la eficiencia de los vehículos convencionales y el kilometraje por año de cada segmento evaluado. Este ahorro se calcula como el combustible que consumirían los VEs si estos fueran vehículos convencionales.

Posteriormente, se calcula el ahorro económico en combustible fósil según los precios promedio de 2017 a 2020 (incluyendo impuestos) reportados por Recope para el diésel y gasolina. Cabe aclarar que en la cuantificación no se tiene en cuenta el costo por consumo energético de los VEs, ya que el objetivo es calcular cuánto combustible fósil se deja de consumir, no cuál es el ahorro económico neto por uso de VEs .

### Beneficios sociales

El potencial de generación de empleos se cuantificó bajo dos metodologías:

#### BEV

Se consideran 2 áreas:

- **Mantenimiento:** Los talleres de mantenimiento probablemente serán establecidos por los representantes de las principales marcas automotrices presentes en Costa Rica. Según las especificaciones de cada segmento, se estima que se produce:

- Un empleo por cada 100 buses/HDV
- Un empleo por cada 150 Mini buses/LDV
- Un empleo por cada 300 vehículos livianos de pasajeros

**-Infraestructura de estaciones de carga:** Incluye la instalación, operación y mantenimiento de la infraestructura requerida para la operación de los BEVs. Para la cuantificación de generación de empleos, una de las premisas es que una estación de recarga atiende 60 vehículos por día. Además, se asume que un año laboral son 260 días.

- **Instalación:** Las instalaciones de nuevas estaciones de recarga se realizan cada año para los vehículos nuevos introducidos.
  - Vehículos eléctricos livianos: se asume que una persona puede instalar 2 cargadores lentos por día, de igual manera se requieren estaciones de carga rápida (con capacidad para 4 vehículos), lo cual demoraría 4 días de instalar.
  - Minibuses, buses, LDV, HDV: estos se recargan en la noche a través de carga lenta, por lo cual se asume que será necesario un día completo de trabajo con una persona realizando la instalación por vehículo nuevo introducido.
- **Operación:** Las estaciones de recarga públicas requerirán personal para su operación del día a día.
  - Vehículos eléctricos livianos: por cada 50 estaciones de 4 puntos de carga rápida hay una persona de asistencia (vía telefónica o viajando por la ciudad para resolver problemas). Un vehículo particular utiliza una estación de carga rápida una vez cada 2 días. Para los vehículos de pasajeros comerciales se estima que usan las estaciones una vez por día.
  - Minibuses, buses, LDV y HDV: se asume que los choferes realizan de manera autónoma la conexión para carga de sus vehículos en la noche, por lo que esta medida no genera empleo adicional.
- **Mantenimiento:** Se basa en las siguientes premisas:
  - Vehículos eléctricos livianos: las estaciones ubicadas en el hogar necesitan mantenimiento una vez por año y esto requerirá 0,25 día por persona de trabajo. Las estaciones de carga rápida (con cuatro puntos) para vehículos livianos también requieren mantenimiento una vez por año, el cual se realizará en medio día de trabajo por persona
  - Minibuses, buses, LDV, HDV: se requiere un mantenimiento por año que toma 0,25 días por persona por cada 260 días al año.

## FCEV

Al igual que en el caso de los BEV, se consideran dos áreas (mantenimiento e infraestructura). No se incluyen los empleos generados por la construcción y operación de las plantas generadoras de hidrógeno.

- **Mantenimiento:** Se toman las mismas premisas que en el caso de los BEV ya que la frecuencia del mantenimiento es similar para ambos tipos de vehículos.

**-Infraestructura de estaciones de carga:** Incluye la instalación, operación y mantenimiento de la infraestructura requerida para la operación de los FCEVs.

- **Instalación:** Se asumen que la instalación de una HRS empleará, desde su diseño hasta su puesta en marcha a los siguientes empleados: 1 ingeniero Sr, 1 ingeniero Jr, 2 empleados de obra civil, 2 instaladores de tubería e instrumentación, 1 instalador del sistema de compresión, 1 instalador del sistema de dispensación y 1 supervisor final de obra. Un equipo de estas características podría instalar una HRS menor a 1000 kg H<sub>2</sub>/día en 30 días y una superior a 1000 kgH<sub>2</sub>/día en 45 días.
- **Operación:** Las estaciones de recarga públicas requerirán personal para su operación del día a día.
  - 2030: Para la operación de las estaciones de recarga de hidrógeno se considerará necesario un empleado por HRS más un supervisor/técnico por cada 10 HRS.
  - 2050: Se considera que la recarga de hidrógeno podría hacerla cada propietario / conductor de un FCEV y que solo será necesario un técnico que resuelva problemas con agilidad por cada 20 HRS.
- **Mantenimiento:** Para el Mantenimiento de las HRS se estima que se requiere un mantenimiento por año que toma 3 personas por dos días por cada año cuando las estaciones son de capacidades menores a 1500 kgH<sub>2</sub>/día y 4 personas por dos días por año cuando las HRS sean de 1500 y hasta 5000 kgH<sub>2</sub>/día anualmente

## Anexo 4 Costo de Abatimiento

### Definición y metodología de cálculo del Costo de Abatimiento

El costo de abatimiento por tonelada de CO<sub>2eq</sub> se define como el diferencial de costo por reemplazar una tecnología de referencia (ICEV) por una alternativa de bajas emisiones (BEV y FCEV para este estudio) por cada tonelada de CO<sub>2eq</sub> dejada de emitir. Para este proyecto el costo de abatimiento se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$C. Abatim. = \frac{CTP \text{ Combustible Fossil} - CTP \text{ Tecnología Alternativa}}{\sum \text{Ton de CO2eq Combustible Fossil} - \sum \text{Ton de CO2eq Tecnología Alternativa}}$$

El costo de abatimiento considera las emisiones generadas por el uso de los vehículos, de acuerdo con los recorridos típicos en Costa Rica, durante su vida útil.

Para el cálculo de emisiones de los FCEV por concepto del hidrógeno consumido se consideró la evolución en el tiempo de la forma de producción del gas, desde un uso combinado Solar PV – Red eléctrica en 2020 hasta una producción 100% con energía hidroeléctrica en 2035 y años posteriores.

### Resultados y conclusiones del Costo de Abatimiento

#### Escenario 2020

Los costos de abatimiento son menores para los BEV que para los FCEV, debido a que actualmente los vehículos BEV tienen un mayor desarrollo tecnológico y su penetración de mercado lleva ya algunos años, mientras que los FCEV tienen menor madurez comercial.

Por su parte, los FCEV tienen menores costos de abatimiento en los segmentos donde técnicamente son más competitivos también: en los vehículos de carga pesada y en los buses.

La figura A4-1 muestra los gráficos de costo de abatimiento en 2020. Se hace la salvedad de que para algunos segmentos aún no hay oferta tecnológica disponible en el mercado: HDV BEV y mini buses FCEV.

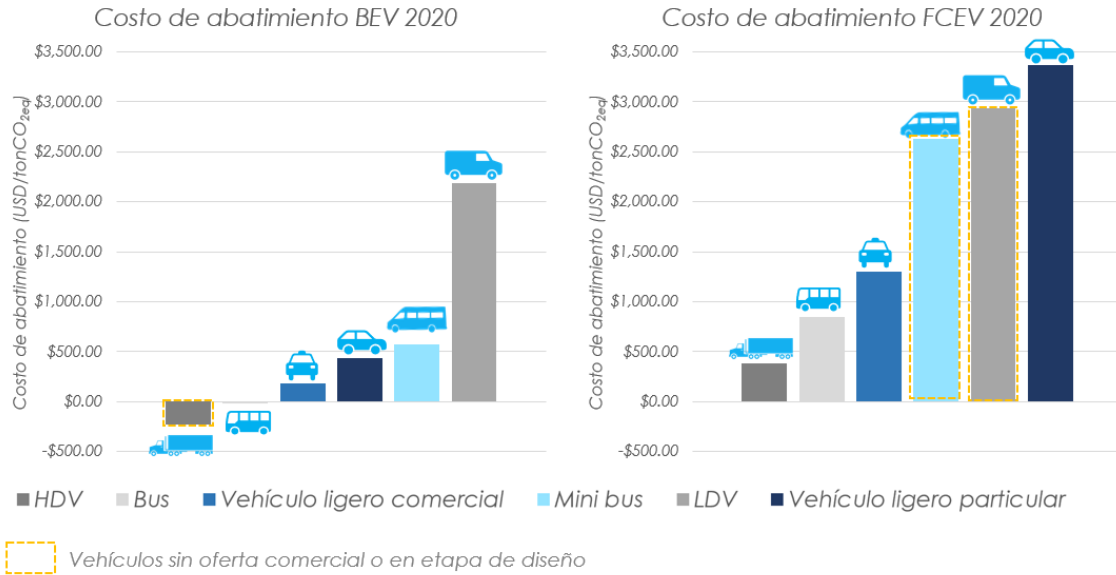


Figura A4-1. Costos de abatimiento de BEV y FCEV 2020

### Escenario 2050

En el año 2050 todos los vehículos eléctricos tendrán costos de abatimiento negativos. Esto significa que la tecnología de combustión interna será más cara en todos los segmentos y que dejar de emitir representará ahorros para los dueños de vehículos.

Si bien, se prevé (Buttner, et al., 2017) que los ICEV no desaparecerían hacia el 2050, su proporción en las flotas será cada vez menor y para los segmentos ligeros, por ejemplo, esta tecnología podría permanecer para aplicaciones recreativas o deportivas.

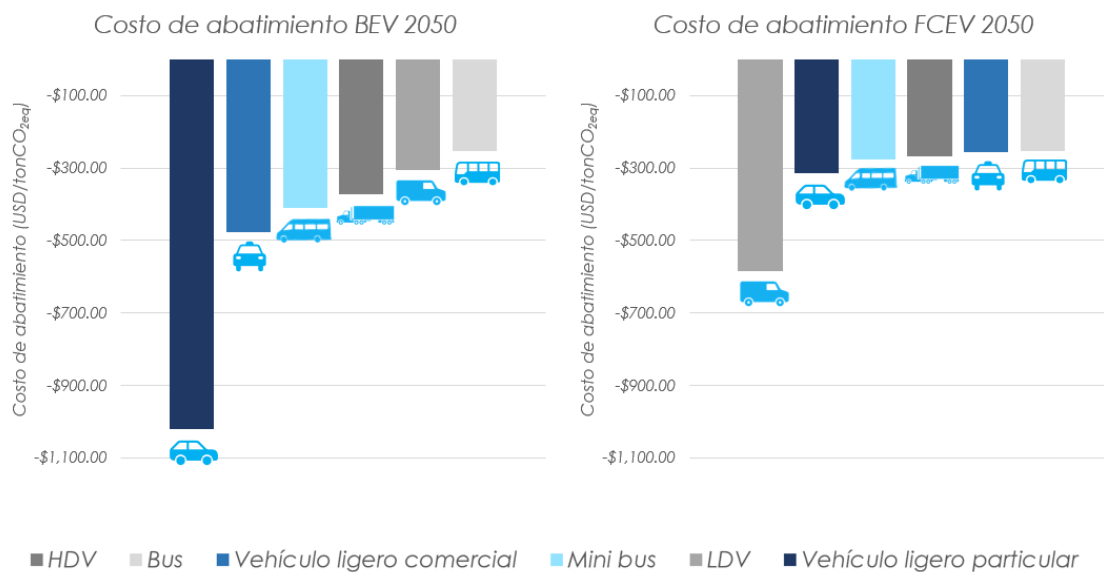


Figura A4-2. Costos de abatimiento de BEV y FCEV 2050

## Bibliografía

Ballard, 2017. Recycling PEM Fuel Cells. *End-of-life management*.

Buttner, W. et al., 2017. Hydrogen monitoring requirements in the global technical regulation on hydrogen and fuel cell vehicles. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 42. s.l.:s.n., pp. 7664-7671.

Climate\_Coalition, C. & C. A. C., 2019. *Reducing Emissions from Heavy-Duty Vehicles and Fuels*. [Online] Available at: <https://www.ccacoalition.org/en/initiatives/heavy-duty-vehicles> [Accessed 21 Mayo 2020].

DLR, LBS & ISE, 2015. Studie über die Planung einer Demonstrationsanlage zur Wasserstoff-Kraftstoffgewinnung durch Elektrolyse mit Zwischenspeicherung in Salzkavernen unter Druck; gefördert durch Bundesministerium für Umwelt. In: [http://www.lbst.de/ressources/docs2015/BMBF\\_0325501\\_PlanDelyKaD-Studie.pdf](http://www.lbst.de/ressources/docs2015/BMBF_0325501_PlanDelyKaD-Studie.pdf), ed. *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*. s.l.:Naturschutz und Reaktorsicherheit.

EC, 2000. DIRECTIVE 2000/53/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 18 September 2000 on end-of life vehicles; in: Official Journal of the European Communities. In: *European Commission*. s.l.:s.n.

EIA, 2019. Annual Energy Outlook 2019 with projections to 2050. In: *US Energy Information Agency*. s.l.:s.n.

Electrive, 2019. *DHL Express & StreetScooter present fuel cell van*. [Online] Available at: <https://www.electrive.com/2019/05/24/dhl-express-street-scooter-h2-van-with-500km-range/>

Elgowainy, A. & Reddi, K., 2015. Hydrogen Fueling Station Pre-Cooling Analysis; . In: *Argonne National Laboratory (ANL): 2015 DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Annual Merit Review*. s.l.:s.n.

EU, 2018. DIRECTIVE (EU) 2018/2001 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). In: s.l.:s.n.

GREET, 2013. Updated Emission Factors of Air Pollutants from Vehicle Operations in GREETM Using MOVES. *Argonne National Laboratory*.

ICE, 2019a. Plan de Expansión de la Generación Eléctrica 2018-2034. *INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD*.

ICE, 2019. Instituto Costarricense de Electricidad Dirección Corporativa de Electricidad, Plan die expansión de la generación eléctrica 2014-2034. In: s.l.:s.n.

ICE, 2020. *Tarifas del ICE*. [Online] Available at: <https://www.grupoice.com/wps/wcm/connect/669c79e9-84c9-4682->

[b63b-136238ebc7e2/Tarifas+actuales.pdf?MOD=AJPERES](#)  
[Accessed 20 Mayo 2020].

ICE, I. C. d. E., 2018. *Proyecciones de la demanda eléctrica de Costa Rica 2018-2040*, San José. Costa Rica: ICE.

IEA, 2017. *Electricity information 2017*. In: s.l.:IEA Statistics.

INEC, I. N. d. E. y. C., 2008. *Estimaciones y Proyecciones de Población por sexo y edad (1950 - 2100)*, San José, Costa Rica: INEC.

James, B. D., 2017. *hydrogen.energy.gov*. [Online] Available at: [https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress17/v\\_e\\_5\\_james\\_2017.pdf](https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress17/v_e_5_james_2017.pdf) [Accessed Febrero 2020].

LBST & Hinicio, 2019. *Future fuel for road freight: Techno-economic & environmental performance comparison of GHG-neutral fuels & powertrains for heavy duty trucks*. In: *An expertise for Fondation Tuck*. s.l.:s.n.

NREL, L. E. & M. P., 2018. *Fuel cell buses in US. Transit Fleets: Current Status 2018*, Denver, Colorado: NREL.

PELP, 2019. *Periodo 2018 – 2022 - Informe de Actualización de Antecedentes 2019; Gobierno de Chile, Ministerio de Energía*. In: *PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA DE LARGO PLAZO*. s.l.:[http://www.energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/20191209\\_actualizacion\\_pelp\\_-\\_iaa\\_2019.pdf](http://www.energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/20191209_actualizacion_pelp_-_iaa_2019.pdf).

PlugPower, 2019. *StreetScooter at Full Speed – Here's a Recap In Case You Missed It!*. [Online] Available at: <https://www.plugpower.com/2019/06/plug-power-streetscooter-at-full-speed-heres-a-recap-in-case-you-missed-it/>

Presidencia\_CR, P. d. C. R. M., 2019. *Plan de Descarbonización*, San José, Costa Rica: Presidencia de Costa Rica.

Pütz, 2018. *Ökologischer und ökonomischer Vergleich der SWG-Busflotte in Abhängigkeit ihrer Zusammensetzung auf den Zeithorizonten „heute“ und „mittelfristig“*. In: *Erstellt im Auftrag von Stadtwerke Gießen AG (SWG)*. s.l.:Bericht Nr. BELICON.

Reuters, 2018. *Japan backs role of nuclear power in 2030 energy plan*. In: s.l.:s.n.

RITEVE, 2018. *Anuario - Revisión técnica vehicular*, San José, Costa Rica: Masterlitho.

Sandberg, U., Goubert, L. & Mioduszewski, P., 2010. *Are vehicles driven in electric mode so quiet that they need acoustic warning signals?*. *International Congress on Acoustics*.

StreetScooter, 2018. *Work XL*. [Online]  
Available at: <https://www.streetscooter.com/de/modelle/work-xl/>

Thor, 2018. *Trucks, Inc.* [Online]  
Available at: <https://www.thortrucks.com>

Toyota, 2017. *Toyota Opens a Portal to the Future of Zero Emission Trucking*. [Online]  
Available at: <http://corporatenews.pressroom.toyota.com/releases/toyota+zero+emission+heavyduty+trucking+concept.htm>

Trucks, 2018. *Toyota Unveils More Advanced Heavy-Duty Fuel Cell Truck Prototype*. [Online]  
Available at: <https://www.trucks.com/2018/07/30/toyota-advanced-fuel-cell-truck/>